



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO INDUSTRIAL

Título del proyecto:

ANÁLISIS Y MEJORA EN LA CALIDAD DE LAS
ALEACIONES DE ALUMINIO PARA EXTRUSIÓN

Sara Echeverría Iturbide

Javier Fernández Carrasquilla

Pamplona, 14 de Septiembre de 2010

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO	7
2.1 Problemática actual	7
2.2 Objetivos concretos	8
2.3 Efectividad de estos objetivos en la calidad final del producto	8
3. MATERIALES, PROCESOS DE FABRICACIÓN Y TRATAMIENTOS	9
3.1 EL ALUMINIO	9
3.1.1 Propiedades	9
3.1.2 Aleantes	11
3.1.3 Aleaciones de aluminio.....	11
3.1.4 Tratamientos térmicos	13
3.2 ALEACION 6060	14
3.3 RECORRIDO DEL ALUMINIO A LO LARGO DE LA PLANTA	15
3.3.1. FUNDICIÓN	15
3.3.1.1. Fusión de la materia prima	16
3.3.1.2. Transvase al horno de mantenimiento	20
3.3.1.3. Tratamiento del metal	24
3.3.1.4. Colada	27
3.3.2. HOMOGENEIZADO	32
3.3.2.1. Subdivisión o escalonamiento	32
3.3.2.2. Crecimiento	33
3.3.2.3. Esferoidización	33
3.3.2.4. Homogeneizado de las barras	37
3.3.3. EXTRUSIÓN	40
3.3.3.1. Corte de las barras	40
3.3.3.2. Precalentamiento de los tochos	41
3.3.3.3. Prensas de extrusión	41
3.3.3.4. Sistemas de enfriamiento	43
3.3.3.5. Maquinaria adicional	43
3.3.4. ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL	45
3.3.4.1. Endurecimiento por precipitación	45

3.3.4.2.	Naturaleza de los precipitados	47
3.3.4.3.	Zonas libres de precipitados	48
3.3.4.4.	Proceso industrial	48
4.	TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES	49
4.1	PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	49
4.1.1	Análisis macroscópico.....	49
4.1.2	Análisis microscópico	49
4.2	DEFINICIÓN DE VARIABLES A CARACTERIZAR	51
4.2.1	Composición química.....	52
4.2.2	Aspecto superficial del tocho	54
4.2.3	Grosor de la zona de segregación.....	54
4.2.3.1	Fundamentos teóricos.....	54
4.2.3.2	Aplicación práctica.....	56
4.2.4	Tamaño de grano	57
4.2.4.1	Fundamentos teóricos.....	57
4.2.4.2	Aplicación práctica	61
4.2.5	Otros posibles defectos	63
5.	PARÁMETROS DE COLADA Y PLAN DE EXPERIMENTACIÓN	64
5.1	PARÁMETROS DE COLADA	64
5.1.1	Velocidad de colada	64
5.1.2	Caudal de agua de refrigeración	64
5.1.3	Nivel del líquido en el molde	65
5.1.4	Temperatura del metal	65
5.2	PLAN DE EXPERIMENTOS	66
5.2.1	Molde en mal estado (detonante)	66
5.2.2	Situación actual	68
5.2.3	Benchmark	69
6.	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS	76
6.1	PRUEBA 1	76
6.2	PRUEBA 2	85
6.3	PRUEBA 3	89
6.4	PRUEBA 4	90
6.5	PRUEBA 5	94
6.6	PRUEBA 6	96

6.7 PRUEBA 7	100
6.8 PRUEBA 8	102
7. CONCLUSIONES	106
8. SUGERENCIAS PARA FUTURAS PRUEBAS	109
9. BIBLIOGRAFÍA	111

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo ha sido realizado durante el periodo de tiempo comprendido entre enero de 2009 y septiembre de 2010, en la planta de Sapa Profiles Navarra, situada en la localidad de Irurtzun. Esto ha sido gracias a un convenio existente entre Sapa Profiles Navarra y la Universidad Pública de Navarra, continuado con un contrato en prácticas en la empresa.

La empresa Sapa Profiles Navarra es una empresa dedicada a la extrusión de perfiles de aluminio. Pertenece a la empresa multinacional Sapa, que es líder mundial en extrusión de aluminio. La planta situada en Irurtzun lleva dedicándose desde la década de los 50 al negocio del aluminio. De esta manera, ha pertenecido a diferentes empresas: Inasa, Reynolds, Alcoa y desde 2007 esta última se dividió en dos partes: Hydro (empresa de laminación de aluminio) y Sapa (empresa de extrusión de aluminio).



Sapa Profiles Navarra cuenta con fundición propia, dos prensas de extrusión junto a un moderno laboratorio para fundición y extrusión. Reforzados por el SAC (Sapa Application Center), un equipo de ingeniería en colaboración con el cliente para proporcionar soluciones de forma conjunta.

La filosofía productiva de Sapa es fabricar perfiles con procesos estables, controlados y capaces para garantizar los requisitos solicitados. Para ello, se selecciona la línea de producción más adecuada, se investigan las diferentes variables que intervienen en el proceso: aleaciones, requisitos mecánicos, tolerancias dimensionales, etc.

Para elegir esta línea de producción más adecuada hay que conocer y tener en cuenta la capacidad productiva de la planta:

Capacidad Productiva			
Peso Perfil	150 g/m (pesos inferiores en desarrollo) - 20 Kg/m		
Espesor	> 0.8 mm (espesores inferiores en desarrollo)		
Tamaño máximo	Tubo redondo 220 mm	Tubo cuadrado 210 x 210 mm	Tubo rectangular 340 x 30 mm
Longitud Máxima	15 metros		
Tamaño prensas	Desde 1.800 hasta 3.500 Tons		

El interés de Sapa es fomentar la cooperación con los clientes para crear valor añadido en cualquier proyecto particular para cada cliente, pero al mismo tiempo, ofrece un amplio rango de perfiles estandarizados para cualquier mercado.



El aluminio puede sustituir a otros materiales como acero, cobre, plástico o madera. La experiencia de Sapa en la extrusión hace de este proceso una alternativa a otras técnicas más costosas, como el forjado o la inyección.

En Sapa Profiles Navarra se trabaja con varias aleaciones de aluminio (1050, 3103, 6060, 6061, 6063, 6005A, 6082), consiguiendo diferentes resultados respecto a propiedades mecánicas o estéticas.

La elección de una u otra aleación viene dada principalmente por los requerimientos mecánicos de la pieza. Las especificaciones de cada aleación se pueden ver en el Anexo II.

Sapa Profiles Navarra está certificada por organismos internacionales que avalan tanto su sistema de gestión como su producto. Asimismo, Sapa Profiles Navarra fue la primera empresa de extrusión de aluminio en España en obtener la certificación ISO-TS 16949 y por supuesto nuestro sistema de gestión medioambiental es conforme con las exigencias de las Normas ISO aplicable a la Fundición y Extrusión del aluminio. Igualmente avalamos nuestro sistema de carpintería R con la Marca N de Producto

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

En este proyecto se pretende mejorar la calidad de las barras de aluminio (materia semielaborada) de extrusión de la aleación 6060, fundidas en Sapa Profiles Navarra.

Este intento de mejora está relacionado con el hecho de que los perfiles resultantes de extrusión pueden ser sometidos a tratamientos posteriores como lacado o anodizado, cuyo éxito dependerá de la calidad superficial que tienen los perfiles al salir de la prensa.

Esta calidad superficial está relacionada con las características de los tochos utilizados en la extrusión.

Esta mejora se podrá observar, además de visualmente, en los parámetros que se midan de la microestructura del tocho.

De esta manera, una superficie más lisa y uniforme con una estructura interna homogénea, da lugar a que los perfiles extruidos tengan una mejor calidad superficial, sobre todo aquellos que después de extruidos vayan a ser anodizados.

2.1 Problemática actual

Actualmente tenemos un tocho con una calidad superficial buena, pero no lo suficiente como para obtener unos perfiles anodizados con una superficie lisa sin ningún tipo de zona oscura.

Estos cambios en la tonalidad del perfil son debidos a la microestructura del tocho con el que se realizan los perfiles. Y según las exigencias estéticas que se requieran y la localización de esos cambios de tonalidad, esos perfiles valdrían o no.

Por esta razón, se quieren hacer cambios en el molde y en los parámetros de colada, que serían entre otros el rediseño del molde actual, aumento en la velocidad de colada, variación en el caudal de agua que llega al molde, etc.

Las coladas realizadas con estos cambios darán como resultado unos tochos cuyas estructuras internas y externas analizaremos en el laboratorio, para ver si los resultados obtenidos son óptimos o por el contrario hay que seguir haciendo cambios.

Estos cambios se explican en el apartado de Plan de experimentos.

2.2. Objetivos concretos

Del objetivo principal, que como he comentado anteriormente es la mejora de la calidad del tocho, se pueden sacar dos objetivos más concretos para llevar a cabo, que explico a continuación:

1. Reducción de la zona de segregación inversa. Esta zona pegada a la superficie del tocho es muy significativa en el análisis de los tochos.
2. Mejora del aspecto superficial de la barra. Zona que está en contacto con el molde al inicio de la colada.

2.3 Efectividad de estos objetivos en la calidad final del producto

El tocho es muy importante en el resultado de la extrusión. Ya que se relaciona con las propiedades mecánicas que se van a conseguir, además de la calidad superficial de los perfiles.

Al reducir la segregación inversa, que es lo que se pretende, se reduciría la zona donde más siliciuros de magnesio hay, por lo que al extruir ese tocho, esa zona que está pegada al exterior de la corteza se eliminaría quedando en el culote de la extrusión.

Esto también está relacionado con la superficie exterior del tocho, donde si conseguimos una superficie lisa, sin rugosidades, el interior del tocho será más homogéneo, por lo que al extruir los perfiles saldrán con una superficie uniforme.

3. MATERIALES, PROCESOS DE FABRICACIÓN Y TRATAMIENTOS

3.1 EL ALUMINIO

El aluminio es un material que tiene unas propiedades únicas, lo que le ha llevado a ser el segundo metal más utilizado en el mundo. Estas son algunas de estas propiedades que explico a continuación: ligereza, alta resistencia, facilidad de mecanizado, excelente resistencia a la corrosión, 100% reciclable ilimitadamente.

3.1.1 Propiedades

El aluminio es ligero, tiene una densidad de 2.700 kg/m^3 , que es 1/3 parte de lo que pesa el acero.

Las aleaciones de aluminio más usadas para extrusión tienen una resistencia que va entre 150 y 300 MPa. A bajas temperaturas, la resistencia del aluminio aumenta. A diferencia de la mayoría de los aceros, que se vuelven quebradizos a bajas temperaturas. A altas temperaturas, la resistencia del aluminio se reduce.

Comparado con otros metales, el aluminio tiene un coeficiente relativamente alto de expansión linear, lo que tiene que ser tenido en cuenta en algunos diseños.

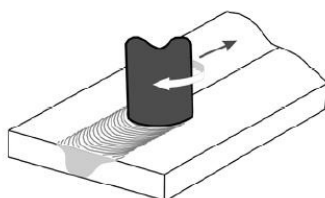
Es un material que se puede trabajar fácilmente, pudiendo cortarlo, taladrarlo, mecanizarlo, curvarlo, etc. Además, el consumo de energía para su mecanizado es muy bajo.

La superior maleabilidad del aluminio es clave para la extrusión. Con el metal, tanto frío como caliente, esta propiedad también es importante para el curvado de bandas y láminas, tanto como para el curvado de los perfiles.

El aluminio es un excelente conductor del calor y la electricidad. Un conductor de aluminio pesa casi la mitad que otro de cobre con la misma conductividad.

Los perfiles de aluminio se pueden soldar mediante diferentes métodos como son la soldadura por fusión o soldadura por fricción (Friction Stir Welding, FSW). La soldadura por fricción es una nueva técnica donde se introduce una herramienta rotativa a presión y se mueve a lo largo de la unión soldada. El calor de fricción generado

calienta el metal, pero sin alcanzar el punto de fusión, a una temperatura inferior a la de los métodos de soldadura de fusión. La herramienta, sometida a alta presión, ejerce un fuerte efecto mecánico en el material y las superficies de unión se adhieren por corte, formando una soldadura sin poros ni inclusiones.



Este método ofrece con respecto a la soldadura de fusión las ventajas de mejor resistencia, mayor estanqueidad y menor deformación debida a la contracción producida al enfriarse el metal.

El aluminio es un buen reflector tanto de la luz visible como del calor irradiado.

Además, reacciona con el oxígeno del aire formando una capa excelentemente fina de óxido. Aunque su espesor es sólo la centésima parte de una micra, esta capa es densa y proporciona una excelente protección contra la corrosión. La capa se autorepara en caso de daños.

Para emplazamientos con mucho peligro de corrosión (cerca del mar, etc.) se realiza en los perfiles un tratamiento posterior, el anodizado. Esta operación incrementa el espesor de la capa de óxido, y por tanto mejora la protección natural contra la corrosión. En exteriores, el espesor suele ser de entre 15 y 25 micras, dependiendo del riesgo de corrosión.

El aluminio es extremadamente duradero en ambientes neutros y ligeramente ácidos.

Además de ser un material no magnético y no tóxico, ya que después del oxígeno y del silicio, el aluminio es el elemento más común de la corteza terrestre.

Y lo que es muy importante, es ecológico. El aluminio es el metal verde: se puede reciclar al 100%, convive en cualquier entorno, el 8% de la corteza terrestre es aluminio en distintas formas. Reciclar aluminio conlleva un ahorro del 95% de la energía necesaria para hacer aluminio de primera fusión.

3.1.2 Aleantes

Para poder trabajar con el aluminio, hay que saber que sus propiedades mecánicas mejoran considerablemente si se alea con otros materiales. De esta manera, se podrá conseguir mayores prestaciones en las distintas aplicaciones.

A continuación, se enumeran los principales aleantes del aluminio, así como las ventajas que proporcionan.

- Cromo (Cr): Aumenta la resistencia mecánica cuando está combinado con otros elementos Cu, Mn, Mg.
- Cobre (Cu): Incrementa las propiedades mecánicas pero reduce la resistencia a la corrosión.
- Hierro (Fe): Incrementa la resistencia mecánica.
- Magnesio (Mg): Tiene alta resistencia tras el conformado en frío.
- Manganeso (Mn): Incrementa las propiedades mecánicas y reduce la calidad de embutición.
- Silicio (Si): Combinado con magnesio (Mg), tiene mayor resistencia mecánica.
- Titanio (Ti): Aumenta la resistencia mecánica.
- Zinc (Zn): Reduce la resistencia a la corrosión.
- Vanadio (Vn): Aumenta la elasticidad del material.

3.1.3 Aleaciones de aluminio

Dentro de las aleaciones de aluminio forjado podemos encontrar dos grandes grupos:

1) Aleaciones de aluminio forjado sin tratamiento térmico

Las aleaciones que no reciben tratamiento térmico solamente pueden ser trabajadas en frío para aumentar su resistencia. Hay tres grupos principales de estas aleaciones según la norma AISI-SAE que son los siguientes:

- **Aleaciones 1xxx.** Son aleaciones de aluminio técnicamente puro, al 99,9% siendo sus principales impurezas el hierro y el silicio como elemento aleante. Se les aporta un 0.12% de cobre para aumentar su resistencia. Tienen una resistencia aproximada de 90 MPa. Se utilizan principalmente para trabajos de laminados en frío.
- **Aleaciones 3xxx.** El elemento aleante principal de este grupo de aleaciones es el manganeso (Mn) que está presente en un 1,2% y tiene como objetivo reforzar al aluminio. Tienen una resistencia aproximada de 16 ksi (110MPa) en condiciones de recocido. Se utilizan en componentes que exijan buena mecanibilidad.
- **Aleaciones 5xxx.** En este grupo de aleaciones es el magnesio es el principal componente aleante su aporte varía del 2 al 5%. Esta aleación se utiliza para conseguir reforzamiento en solución sólida. Tiene una resistencia aproximada de 28 ksi (193MPa) en condiciones de recocido.

2) Aleaciones de aluminio forjado con tratamiento térmico

Algunas aleaciones pueden reforzarse mediante tratamiento térmico en un proceso de precipitación. El nivel de tratamiento térmico de una aleación se representa mediante la letra T seguida de un número por ejemplo T6. Hay tres grupos principales de este tipo de aleaciones.

- **Aleaciones 2xxx:** El principal aleante de este grupo de aleaciones es el cobre (Cu), aunque también contienen magnesio Mg. Estas aleaciones con un tratamiento T6 tiene una resistencia a la tracción aproximada de 64ksi (442 MPa) y se utiliza en la fabricación de estructuras de aviones.
- **Aleaciones 6xxx.** Los principales elementos aleantes de este grupo son magnesio y silicio. Con unas condiciones de tratamiento térmico T6 alcanza una resistencia a la tracción de 42 ksi (290MPa) y es utilizada para perfiles y estructuras en general.
- **Aleaciones 7xxx.** Los principales aleantes de este grupo de aleaciones son cinc, magnesio y cobre. Con un tratamiento T6 tiene una resistencia a la tracción aproximada de 73ksi (504MPa) y se utiliza para fabricar estructuras de aviones.

3.1.4 Tratamientos térmicos

Según las aleaciones y sus aplicaciones de los perfiles, a estos se les pueden aplicar los siguientes tratamientos térmicos:

F → Según fabricación

O → Recocido

H1 → Endurecimiento por acritud solamente.

H2 → Endurecimiento por acritud y recocido parcial.

H3 → Endurecimiento por acritud y estabilización (propiedades mecánicas estabilizadas mediante tratamiento térmico a baja temperatura).

T1 → Enfriamiento desde proceso de conformado a temperatura elevada y maduración natural hasta una condición básicamente estable.

T2 → Enfriamiento desde un proceso de conformado a alta temperatura, acritud y maduración natural hasta una condición básicamente estable.

T3 → Tratamiento estable de solución, acritud y maduración natural hasta una condición básicamente estable.

T4 → Tratamiento térmico de solución y maduración natural hasta una situación básicamente estable.

T5 → Madurado y envejecido naturalmente.

T6 → Madurado y envejecido artificialmente.

T7 → Tratamiento térmico de solución y estabilización.

T8 → Tratamiento térmico de solución, acritud y maduración artificial.

T9 → Tratamiento térmico de solución, maduración artificial y acritud.

T10 → Enfriamiento desde un proceso de conformado a alta temperatura, acritud y maduración artificial.

Existen otros tratamientos, como por ejemplo T66, que dan como resultado unas propiedades mecánicas mejores que las obtenidas con un T6. Y según el proceso posterior también puede elegirse un tratamiento u otro, por ejemplo el T64 se suele aplicar cuando inmediatamente después se va a curvar el perfil.

3.2 ALEACION 6060

La aleación de aluminio 6060 es la aleación más empleada en Sapa Profiles Navarra.

Esta familia (6XXX) tiene unas propiedades muy atractivas en cuanto a su uso y su producción, ya que alcanzan resistencias de entre 150 y 350 MPa, junto con su buena tenacidad y conformabilidad.

Sus buenas propiedades mecánicas, buen acabado superficial y sobre todo su fácil extrusionabilidad, hacen que la aleación 6060 se emplee muy habitualmente.

El coste de extruir una 6060 es inferior a extruir cualquier otra aleación ya que al no ser una aleación cargada, no se pega al molde; además, se enfría con aire y no con agua, ya que no es necesario provocar un descenso de la temperatura tan rápido como el requerido en el caso de aleaciones con un mayor contenido en aleantes.

El proceso de extrusión es más rápido (se utilizan mayores velocidades), dando como resultado una mayor productividad.

3.3 RECORRIDO DEL ALUMINIO A LO LARGO DE LA PLANTA

Para llevar a cabo la fabricación de perfiles de aluminio, se deben realizar una serie de procedimientos coordinados a lo largo de toda la fábrica. De esta manera el curso del aluminio en la planta es el siguiente:

3.3.1 FUNDICIÓN

Para poder producir perfiles de aluminio, se necesita tener unas barras de aluminio (tochos) que alimenten la prensa de extrusión. Estas barras se obtienen dentro de la zona de fundición de la planta. Es ahí donde el aluminio va pasando por una serie de fases que incluye la fusión de la materia prima seleccionada previamente para obtener la composición requerida, el trasvase desde los hornos de fusión al de mantenimiento, unos tratamientos de naturaleza física y química para mejorar de las características del metal, y por último, el proceso de colada en los moldes.



3.3.1.1 Fusión de la materia prima

La carga de la materia prima para fusionar se lleva a cabo en el horno de gas natural, que tiene una capacidad para 30 toneladas de aluminio fundido.

Este horno tiene un recubrimiento de ladrillos refractarios en su interior, para poder alcanzar altas temperaturas sin dañar la estructura del horno.



Horno de fusión vacío



Horno en funcionamiento

La radiación es la principal causa de transmisión de calor en este tipo de hornos, a pesar de la buena conductividad térmica del aluminio. Existen unos termopares situados en la bóveda del horno y otros sumergidos en el caldo, para regular la temperatura.

En la fusión de la materia prima hay que tener en cuenta principalmente dos aspectos: la *naturaleza* de las materias primas y la *temperatura* de fusión del horno.

Materia prima utilizada

La materia prima que se utiliza puede ser de diferentes tipos según su composición y procedencia:

- Lingotes de aluminio primario.
- Lingotes de segunda fusión.
- Material recuperado del proceso de fabricación (fundición y extrusión).
- Chatarra comprada del exterior.
- Lingotes de aleación madre.

Los lingotes de aluminio primario o de electrólisis suelen tener una pureza del 99.5% (A-5) ó 99.7% (A-7), con pequeños contenidos de hierro y silicio. Se emplean fundamentalmente para bajar los contenidos de algún elemento que presente niveles demasiado altos en el material de chatarra.



Lingotes de A-7

Los lingotes de segunda fusión se compran a plantas que se dedican a la recuperación de aluminio. Estos lingotes, junto con la chatarra externa, se emplean porque su precio es inferior al de los lingotes de aluminio primario. Sabemos que el aluminio es 100% reciclable, manteniendo sus cualidades físicas. El proceso de refundido requiere sólo un 5% de la energía necesaria para producir el metal primario inicial.



Código del reciclaje de aluminio

La chatarra interna (perfiles que no tienen los requerimientos exigidos al extruir como rectitud o cotas, además de los culotes y saneamientos de las barras) no genera problemas, y se consume a medida que se va generando.

Los lingotes de aleación madre son aquellos compuestos por aluminio y otro elemento base (hierro, cobre o cromo) necesario para conseguir una determinada composición. Los metales de bajo punto de fusión, como el magnesio y el zinc, se añaden en estado puro.



Lingotes de Aleación titanio



Aleantes: AlCr, AlFe, AlCu, AlMn

Antes de realizar la carga del horno de fusión, se introduce el material de carga (lingotes, chatarra, etc.) en un horno para quitarle la humedad que puedan tener.



Horno

Carga del horno de fusión

La carga del horno de fusión se realiza después de sacar el material de carga del horno, y se lleva a cabo a través de una puerta colocada frente a los quemadores.

Hay que cargar el horno de fusión de una determinada. Se empieza con la chatarra de menor espesor, seguida por los lingotes de mayor tamaño. Después, se añaden las aleaciones madre y, una vez que se ha fundido todo el metal previamente introducido en el horno, se añade el magnesio. Si este elemento no se sumerge de manera adecuada,

pueden quedar zonas con una concentración elevada en la superficie, debido a que tanto su densidad y como su punto de fusión son menores que las del aluminio. Estas acumulaciones se queman y oxidan con facilidad, desprendiendo un humo blanco compuesto por pequeñas partículas de óxido de magnesio que pueden quedar dispersas como inclusiones en el material fundido.



Carga del horno de fusión

Terminado el proceso de carga se realiza el desescoriado. Esta última operación consiste en un barrido y arrastrado de la superficie del metal fundido con el fin de eliminar la capa de óxidos e impurezas formada. Se lleva a cabo con los quemadores apagados y a través de una pequeña puerta que tiene el horno.



Pala para desescoriar

Temperatura del aluminio

En el interior del horno la temperatura del caldo suele estar en torno a los 740°C, aunque el punto de fusión del aluminio es de 658°C, esto es así para poder efectuar todas las operaciones que se realizan sobre el metal fundido antes de que finalmente llegue a la mesa de colada.

Trabajar por encima de esta temperatura (740°C) genera problemas, ya que contribuye a aumentar la oxidación del aluminio y al deterioro del material refractario del horno, y constituye un gasto innecesario de combustible.

La oxidación del aluminio a temperatura ambiente es lenta y limitada, pero en estado líquido se produce rápidamente, y crece al aumentar la temperatura. A la temperatura de trabajo la formación de una película de alúmina es instantánea, y progresa por difusión. Si la capa de óxido tiene un espesor excesivo, se reduce la velocidad de fusión del metal, y además constituye una fuente importante para la aparición de inclusiones de óxido de aluminio.

Otro efecto derivado del aumento de la temperatura es que se produce un incremento en la tendencia del aluminio a absorber gases, principalmente hidrógeno cuyo origen se encuentra en la humedad ambiental ($3\text{H}_2\text{O (v)} + 2\text{Al} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) y en los gases producidos durante la combustión.

Por este motivo, a medida que desciende la temperatura del metal a lo largo del proceso de colada, disminuye la solubilidad de los gases y el exceso de estos se desprende al exterior, provocando la aparición de poros en el interior del material solidificado.

3.3.1.2 Transvase al horno de mantenimiento

Después del desescoriado, parte del metal líquido del horno de fusión pasa a través de una canaleta a otro horno llamado horno de mantenimiento. La nueva capa de escoria, que aparece en la superficie del metal fundido al caer en el interior del nuevo horno, se elimina manualmente de forma sencilla. En la siguiente fotografía se puede observar cómo sale el aluminio del horno de mantenimiento por la canaleta.



Horno de mantenimiento

La función de este horno, llamado también horno de colada o de espera, es la de mantener el aluminio fundido, y permitir que su alimentación a la mesa colada sea suave y constante durante todo el proceso.

Es un horno con forma cilíndrica que puede albergar hasta 6 toneladas de aluminio (las que se colarán posteriormente repartidas en doce barras). Su tapa puede bascular horizontalmente y tiene en su interior unas resistencias de 35 kW de potencia. Esto hace que el horno pueda fundir lingotes de elementos aleantes pero no tiene la suficiente potencia como para aumentar la temperatura del aluminio una vez que ha sido transferido desde los hornos de carga.

Las ventajas de la utilización de este horno provienen de emplear menos cantidad de aluminio que en el horno de fusión.

Se podría prescindir de este horno para la fusión del aluminio, pero su empleo mejora el proceso de carga de materias primas durante la colada. Además se puede controlar mejor la temperatura del aluminio, conseguir una mayor limpieza del fluido y uniformidad en la composición, y ayuda en las operaciones de desescoriado dado su tamaño y fácil acceso.

Corrección de la composición

En la mitad del transvase se toma una muestra para llevar a cabo el análisis de su composición. Esta acción se realiza de la siguiente manera:

- 1- Preparación de la probeta en la colada.
 - 2- Mecanización de la probeta.
 - 3- Análisis de la probeta.
- 1- Preparación de la probeta en la colada.



Para ello, se necesita tener el molde de las probetas en temperatura colocado cerca de la canaleta. Primero, se retira la capa de óxido en la canaleta. Después, se coge con la cuchara una muestra del aluminio fundido que pasa por la canaleta, se vierte de manera constante en el molde (a), y a continuación, se enfría la probeta en el cubo de agua que está cercano al molde (b).

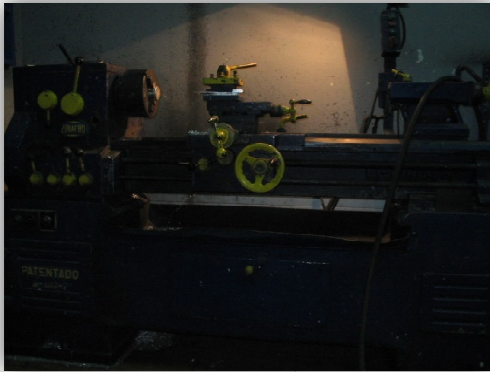
Lo habitual es retirar la primera muestra y coger la siguiente, ya que en la primera, los utensilios pueden no estar a la temperatura adecuada.



Seta para analizar

2- Mecanización de la probeta.

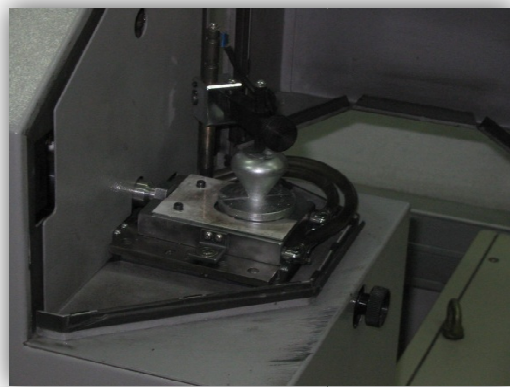
Para poder analizar la probeta en el espectrómetro tiene que tener una superficie lisa y uniforme, por lo que primero hay que mecanizarla. Para llevar a cabo esta tarea, se utiliza un torno Pinacho como el siguiente:



Se coloca la probeta en el cabezal del torno y se tornea utilizando el avance automático. Una vez mecanizada, hay que evitar tocar o apoyar la superficie torneada para que no se contamine.

3- Análisis de la probeta.

Con la probeta recién torneada, llevamos a cabo su colocación en el espectrómetro de emisión atómica (ARL 3460) con fuente de chispa, que permite el análisis cuantitativo de 19 elementos simultáneamente.



Utilizando la fijación de probetas en la zona de chispeo (para que todos los análisis estén a la misma distancia del centro de la probeta), se realizan tres chispazos separados 120°.



Una vez conocida la composición, se efectúan las correcciones pertinentes, añadiendo los aleantes necesarios. Como no es posible disminuir la concentración de un determinado elemento, se intenta que en el horno de fusión sea siempre algo más baja que la deseada, para así poder ajustarla con posterioridad en el horno de colada.

Una vez finalizada la corrección y llevado a cabo el desescoriado, se toma una nueva muestra para confirmar que la composición es la adecuada.

3.3.1.3 Tratamiento del metal

Podemos encontrar diversos equipos para el tratamiento del metal a lo largo de la canaleta que va del horno de mantenimiento a la mesa de colada.

Estos equipos realizan una mejora considerable en las características microestructurales del material una vez solidificado, ya que lo someten a unos tratamientos de naturaleza tanto física y como química.

Desgasificado

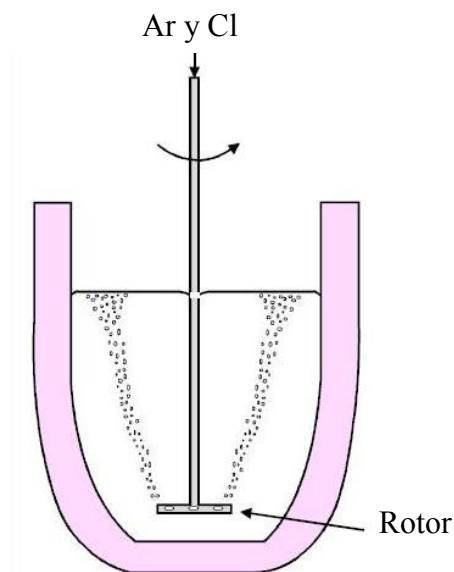
La presencia de hidrógeno en el metal fundido provoca la aparición de poros en el material. Estos poros generados afectan negativamente a la extrusionabilidad del aluminio. Para que su influencia sea detectable, el nivel de porosidad tiene que ser muy

elevado, pero si a esto se le añade la presencia de inclusiones no metálicas asociadas a los poros, los efectos pueden ser muy negativos.

Para evitar este problema se realiza la operación de desgasificado en modo continuo.

El equipo para realizar el desgasificado consiste en un rotor que agita el metal fundido, mientras simultáneamente se produce la adición de una mezcla de argón y cloro que provoca el arrastre del hidrógeno y las partículas hasta la superficie.

De esta manera se consigue un descenso de los niveles de hidrógeno disuelto y de inclusiones.



En este proceso es necesario controlar el caudal de los gases introducidos y la velocidad de giro del rotor, ya que la eficacia de este proceso aumenta a medida que disminuye el tamaño de las burbujas que se generan.

De esta manera, si la velocidad de giro es muy lenta el tamaño de las burbujas aumentará, y si por el contrario es muy rápida, se formará un vórtice que dificultará el desarrollo óptimo del proceso.

En la práctica se puede comprobar que la eficacia de este procedimiento es muy elevada, ya que se consigue alcanzar valores para el hidrógeno disuelto en torno a $0,10 \text{ cm}^3$ por cada 100 g. de material, cuando inicialmente el metal suele tener cantidades del orden de $0.3\text{-}0.4 \text{ cm}^3/100\text{g}$. Y añadiendo pequeñas cantidades de cloro, la presencia de inclusiones disminuye hasta en un 50%.

Afinado de grano

La presencia de granos de gran tamaño en el tocho de aluminio hace que su extrusionabilidad sea mala, ya que el aluminio no fluye por el contenedor y por la matriz tan bien como en el caso de que tenga granos pequeños.

El aluminio suele solidificar formando granos relativamente grandes, éstos serán mayores contra más puro sea el metal.

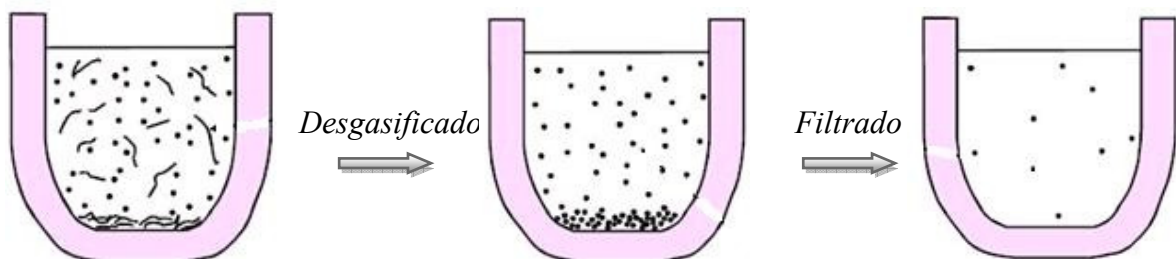
Por esta razón se emplean diferentes técnicas de afinado para conseguir la cristalización de un grano de tamaño pequeño. Actualmente, se introduce de forma continua una varilla de Titanio directamente en la canaleta que une el horno de mantenimiento con la mesa de colada. Esta máquina posee un motor de velocidad variable (normalmente 55cm/min) y dos rodillos dentados que arrastran la varilla al pasar por ellos. Antes, su adición era mediante la introducción de pequeños lingotes en el horno de mantenimiento. Pero está demostrado que con la varilla, la dosificación es más homogénea y, por tanto, más eficaz.

Filtrado

La última operación antes de colar el aluminio es hacerlo pasar a través de un filtro cerámico. De esta manera, se eliminan las partículas que pudieran existir en el caldo a raíz de la adición del afinante o pertenecientes a las paredes de la canaleta que al pasar el caldo por ella han podido ser arrancadas.

El tamaño de poro del filtro utilizado suele ser de 20 Armstrong (20 ppm). Es un tamaño suficiente para coger esas partículas sueltas y que deja pasar el caldo sin obstruirse.

En la siguiente figura, se muestran los óxidos presentes en el aluminio fundido, y su escasa presencia después de tratamientos al metal.



3.3.1.4 Colada

A continuación, se va a explicar el proceso de colada mediante el cual se obtendrán unas barras para su posterior extrusión.

En Sapa Profiles Navarra hay un proceso de colada semicontinua por enfriamiento directo, durante el cual el aluminio líquido se vierte sobre un molde refrigerado por agua y abierto por su parte inferior, por el cual va descendiendo la barra que se está formando.

Existen varios diseños de los equipos de colada. En Sapa, el equipamiento para colar el caldo de aluminio se compone de cuatro elementos principales: distribuidor, moldes, sistema de tobera-flotador y mesa de falsos fondos.

Partes del proceso de colada

Distribuidor

La distribución del caldo de aluminio por la mesa de colada se lleva a cabo mediante el distribuidor. Consiste en una estructura metálica recubierta por un material refractario que reduce las pérdidas de calor, a la que le llega el aluminio líquido por la canaleta procedente del horno de mantenimiento, y desde ahí se dirige hacia cada uno de los moldes de la mesa. El mismo caudal de caldo se vierte en todos los moldes a la misma temperatura y presión.



Distribuidor llenándose de aluminio en la colada

Moldes

El molde es uno de los elementos clave en el proceso de colada. Es una pieza cilíndrica y hueca, de aleación de aluminio con un casquillo de grafito en la parte interior y que se refrigera exteriormente por agua.

Anteriormente, los moldes se fabricaban completamente de aluminio, sin llevar el casquillo de grafito. Pero se ha añadido este casquillo ya que reduce los desperfectos causados por una temperatura excesiva. Además, la necesidad de lubricación es menor y se consigue un mejor aspecto superficial de las barras. Hay lugares en los que se utilizan moldes hechos de cobre, por ser éste un buen conductor, pero lo que no se emplea en ningún caso es acero, ya que produce defectos en la superficie de las barras.



Molde con sus agujeros de enfriamiento

Existen moldes de distintas dimensiones. En Sapa Profiles Navarra tenemos moldes de 6, 8 y 9 pulgadas de diámetro. Cuando son moldes de seis pulgadas, encontramos 20 huellas en la mesa. Si es de ocho pulgadas, tenemos 16 huellas en la mesa de moldes. Y si el molde es de nueve pulgadas, la mesa de moldes tendrá 12 huellas.

El molde tiene que estar bien lubricado y su superficie interna sin imperfecciones, ya que el aluminio va a estar en contacto directo con ésta, dependiendo de ella la calidad superficial del tocho.

Al colar el aluminio en el molde a través de las toberas, se produce el enfriamiento primario que es el realiza al entrar en contacto el aluminio con las paredes del molde. A causa de este contacto se forma una costra reteniendo al aluminio líquido en su interior.

De la parte inferior del molde sale una cortina de agua que incide con un ángulo adecuado sobre la superficie de la barra, enfriando más la barra de aluminio.

Cuando se acaba el molde, la barra sigue descendiendo por el pozo lleno de agua. Es entonces cuando se produce el enfriamiento secundario, terminando de enfriar por completo la barra.

Sistema pipa- flotador

Se emplea un modelo con un sistema de regulación del nivel de aluminio del tipo tobera-flotador. Estas dos piezas están separadas una distancia concreta, dejando pasar un flujo de aluminio constante. El aluminio líquido desciende por la tobera y el flotador hace que si el nivel del aluminio es alto, éste tape la salida de la tobera y así deja de entrar aluminio en el molde hasta que se alcance de nuevo el nivel prefijado de aluminio.

Las dos piezas están hechas de un material cerámico.



Pipa, flotador y molde

Mesas de falsos fondos

El aluminio va fluyendo por el molde formándose la barra. Es ese descenso de la barra el que se realiza gracias a la mesa de falsos fondos.

La mesa de falsos fondos es una superficie horizontal que se desplaza gracias a un sistema hidráulico. Tienen unos pivotes circulares que cierran y taponan la parte inferior de los moldes en el inicio de la colada, impidiendo que el aluminio líquido salga por debajo sin solidificar.

La mesa va descendiendo a una velocidad de bajada, determinada para cada aleación, de manera vertical dejando que llegue aluminio al molde y solidifique al enfriarse.

La profundidad del pozo situado debajo de la máquina de colada limita el recorrido de la mesa, y por ello la longitud de las barras, que suele estar en torno a los 4 metros (como máximo 4.5m).



Mesa de falsos fondos para 16 barras

Obtención de las barras

Al colarse todo el caldo que estaba en el horno de mantenimiento en los moldes de la mesa, ya se han formado las barras completamente, por lo que ahora se desmonta el equipo de colada. Primero se limpian los restos de aluminio que quedan en las canalizaciones, después se retira la mesa de los moldes y, por último, se hace ascender la mesa de los falsos fondos, para de esta manera poder sacar las barras del pozo ayudados de un puente grúa.

Por último, se juntan las barras con las obtenidas en otras coladas, y se las prepara para la siguiente etapa del proceso, el tratamiento de homogeneizado.



Ascenso de las barras mediante puente grúa

3.3.2 HOMOGENEIZADO

El homogeneizado es un tratamiento térmico de difusión sólida que mejora la estructura interna del material para el proceso de extrusión que va a continuación.

Con este tratamiento se consigue que las fases intermedias se transformen, se rompan y se esferoidicen. Además se eliminan las variaciones en la concentración local de elementos solubles y con alta velocidad de difusión como son el magnesio y el silicio.

Como consecuencia del tratamiento de esferoidización, las partículas de silicio experimentan una evolución en la que cabe distinguir tres etapas o fases que se comentan a continuación.

3.3.2.1 Subdivisión o escalonamiento

Este primer estado de la evolución de los cristales de silicio aparece en aquellos puntos más activos de la superficie del cristal, con mayor energía libre, llamados escalones de esferoidización. Los contornos o aristas vivas de los cristales aparecen redondeados después de la subdivisión, debido a la redisolución parcial del silicio eutéctico; su división produce una reducción de su longitud.

Por el hecho de producirse la subdivisión de las partículas de silicio, su número aumenta y su morfología tiende hacia la forma ideal que es la esférica.

En el caso de los cristales de silicio eutéctico pertenecientes a aleaciones sin modificar, esta primera etapa de escalonamiento aparece claramente. Mientras que en el caso de aleaciones modificadas, con silicio eutéctico, no se detecta escalonamiento debido a que los cristales de silicio se presentan ya redondeados. Sin embargo, en el caso de que exista silicio no modificado, sí se produce esta primera etapa.

La subdivisión tiene lugar en un amplio margen de tiempos y depende de la temperatura. A temperaturas bajas, esta primera etapa siempre tiene lugar, existiendo una subdivisión previa en estrechamientos o puntos de crecimiento de los brazos dendríticos.

Los poliedros de silicio primario suelen cambiar de morfología para tiempos de tratamiento prolongados cuando la temperatura es baja, pero cuando son temperaturas cercanas a la eutéctica, 550 °C, la evolución es más rápida. Los cristales de silicio

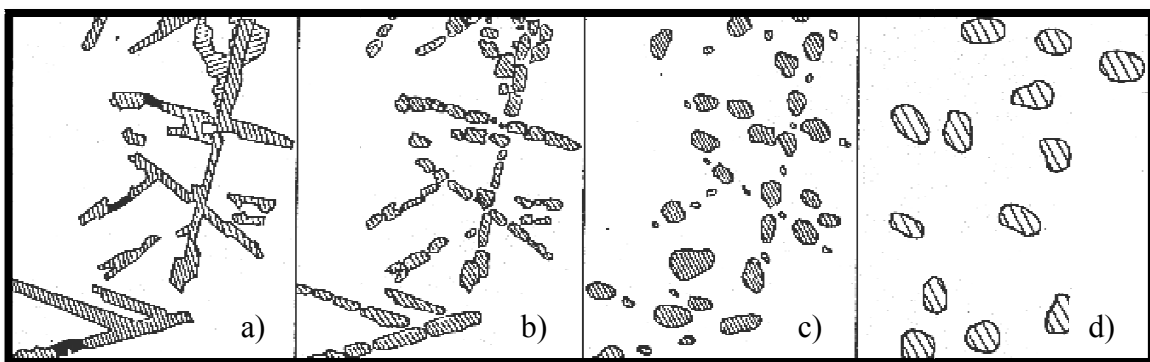
primario tienden a disolverse. Parece tratarse siempre de un proceso de disolución por zonas más activas.

3.3.2.2 Crecimiento

Tras producirse la subdivisión de las partículas de silicio, el siguiente paso es el de crecimiento, en el que unas partículas crecen a expensas de otras por la falta de homogeneidad del silicio en la fase matriz, lo que supone la existencia de un gradiente de concentración, y provoca un flujo o trasiego de átomos de silicio, desde las partículas de menor radio hacia las de mayor, con el fin de mantener el equilibrio de la interfase. En este estado se consigue una redistribución más homogénea de las partículas de silicio, disminuye el número total de partículas, y su forma se hace más esférica. Este proceso se desarrolla de forma continua a tiempos de tratamiento prolongados.

3.3.2.3 Esferoidización

Se tiende a la forma más estable de las partículas de silicio, que es la esférica; la etapa de esferoidización se superpone a la de crecimiento, sin una separación clara. La evolución descrita se puede considerar válida para cualquier estructura, independientemente del contenido de silicio de la aleación. Un esquema de esta evolución se esquematiza en la siguiente figura.



Evolución que experimentan los cristales de silicio eutéctico (Al-13Si), durante el tratamiento de esferoidización: a) Estructura original, cristales de silicio ramificado, b) Primera fase del proceso de subdivisión de cristales, c) Engrosamiento y disminución del número de partículas, d) Estructura final idealizada, partículas esféricas.

Mecanismo de esferoidización

Durante el crecimiento ninguna de las partículas puede cambiar su volumen, sin que se produzca un cambio en el resto de partículas de la misma fase, que permita la conservación del volumen total.

En la etapa de esferoidización, se aprecia que unas partículas crecen a expensas de las otras, que desaparecen. Si se consideran dos partículas adyacentes con diferente diámetro, la concentración de soluto en la matriz adyacente a la partícula aumenta cuando el radio de curvatura decrece, debido al efecto Gibbs-Thomson. Por lo tanto, habrá una falta de homogeneidad de silicio en la matriz de fase α , lo que supondrá la existencia de un gradiente de concentración (factor base para que haya difusión) en la matriz, como consecuencia, se producirá la difusión de átomos de silicio, desde las partículas de menor radio a las de mayor radio, con el fin de mantener el equilibrio de la interfase. El resultado será que el número total de partículas decrece y el radio medio (r) crece con el tiempo.

El origen del crecimiento de una partícula de silicio radica en que con un radio de curvatura pequeño tiene una energía libre molar más alta que con un radio de curvatura grande: la energía libre molar disminuye al aumentar el radio de curvatura. De esto se deduce que el número total de partículas decrece y el radio medio (r) se incrementa con el tiempo.

El crecimiento de grano en los materiales policristalinos se produce debido a la disminución que experimenta la energía total del sistema por reducción de la superficie de los granos de silicio. La energía superficial total de las partículas de silicio se reduce por engrosamiento. Bajo condiciones ideales, la cinética de crecimiento de grano puede obedecer a la ley propuesta por Lifshitz y Slyovz, que describe el crecimiento del tamaño medio de partícula como una función del tiempo, de acuerdo con el modelo de maduración de Oswald, de la siguiente ecuación.

$$D^m - D_o^m = Kt$$

donde D es el diámetro medio de partícula, después de un tiempo de tratamiento (t), K es un parámetro dependiente de la temperatura, del coeficiente de difusión, de la energía interfacial (γ) y de la concentración en el equilibrio (X_e) de las partículas más grandes; y D_o es el diámetro medio de partícula a tiempo cero.

Dado que el coeficiente de difusión y X_e aumentan exponencialmente con la temperatura, la velocidad de crecimiento de las partículas se incrementará rápidamente al aumentar la temperatura (Fig. 3.3).

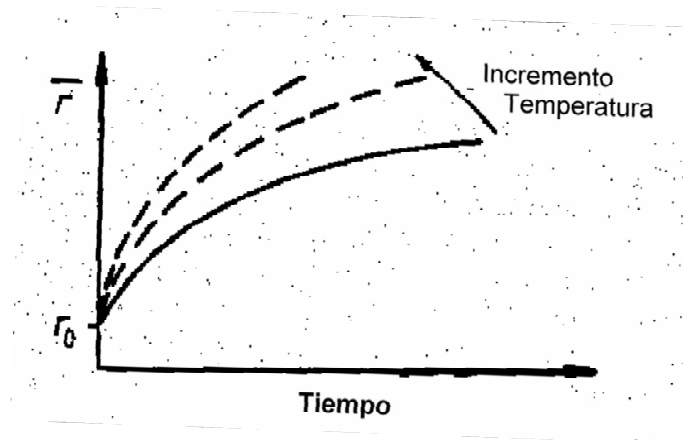


Diagrama esquemático que muestra cómo varía el radio medio con el tiempo, a diferentes temperaturas.

El parámetro de velocidad K varía con la temperatura de acuerdo con la ecuación de Arrhenius:

$$K = K_o \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

donde el parámetro de velocidad K se relaciona con la energía de activación Q , la cual puede utilizarse para deducir el mecanismo de crecimiento:

$$D = K_o t^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

Factores que intervienen en el proceso de esferoidización

El proceso de esferoidización está influenciado por una serie de factores, como son la temperatura a la que se efectúa el ensayo, el tiempo de tratamiento, la estructura de partida (modificada o no modificada) y la composición de la aleación.

Los cambios producidos a raíz del proceso de esferoidización, revierten en una variación de las propiedades mecánicas, dureza, alargamiento, etc. La redistribución de los cristales de silicio en la matriz de aluminio provoca una mejora en el comportamiento plástico y en la maquinabilidad de la aleación.

- Influencia del tiempo de tratamiento

Anteriormente se ha indicado la evolución que experimentan las partículas de silicio en el proceso de esferoidización, durante el que se suceden tres etapas o fases, que

evolucionan a medida que aumenta el tiempo de tratamiento. Las aleaciones de aluminio-silicio que han sido sometidas al proceso de modificación presentan un mayor grado de esferoidización que las no modificadas a tiempos de tratamiento menores.

Esta misma situación se observa en las aleaciones moldeadas en molde permanente, con eutéctico fino, respecto a las moldeadas en arena. En las partículas de silicio el diámetro medio, la relación de tamaños y el número de partículas varían en función del tiempo de tratamiento. Inicialmente, en la etapa de subdivisión o escalonamiento, el diámetro medio de partícula disminuye debido a la fragmentación de las partículas.

Posteriormente, en las etapas de crecimiento y esferoidización, se produce un aumento en el diámetro medio. El diámetro medio de cristal de silicio es mucho menor en las muestras modificadas que en las no modificadas. El número de partículas varía inversamente con el diámetro de partícula mientras que el volumen total de silicio permanece constante.

En cuanto a la relación de tamaños, se produce inicialmente una mayor variación en las aleaciones no modificadas que en las modificadas, debido a la etapa de subdivisión. Lo mismo ocurre en las aleaciones moldeadas en arena respecto a las coladas en molde permanente.

- Influencia de la temperatura

La temperatura de tratamiento juega un papel importante en la determinación de las características de las partículas de silicio. La velocidad de esferoidización es directamente proporcional a la temperatura del tratamiento. La energía de activación para el crecimiento, según Calvo y colaboradores, es de 80 kcal/mol, lo que indica que tal proceso es muy sensible a las fluctuaciones de la temperatura. La temperatura a seleccionar para el tratamiento térmico depende de la composición química de la aleación. El incrementar la temperatura supone el facilitar la difusión de los átomos de silicio, con lo que se logra una buena homogeneización en el seno de la matriz.

Los ensayos de dureza muestran que el aumento de la temperatura de tratamiento provoca un descenso acusado de esta propiedad para el mismo tiempo de ensayo.

- Influencia de la composición y estructura de partida

La composición y estructura de partida influyen directamente sobre el tiempo y temperatura empleados durante el proceso de esferoidización. El aspecto fibroso del silicio eutéctico de una aleación modificada, es decir, libre de aquellos puntos más

activos de la superficie del cristal con mayor energía libre, supone que la primera etapa de subdivisión no se produzca, mientras que tiene lugar en la aleación no modificada.

La temperatura de tratamiento se elige en función de la composición química, ya que temperaturas demasiado altas suponen la fusión de los intermetálicos situados en el límite de grano, que tienen una temperatura de fusión próxima a la temperatura eutéctica del sistema aluminio-silicio. Generalmente, estos intermetálicos contienen hierro.

En las aleaciones aluminio-silicio sin modificar, los cristales de silicio eutéctico tienen forma acicular y ramificada, con contornos puntiagudos que favorecen la aparición de microgrietas y reducen la ductilidad de la aleación. Por otra parte, el silicio modificado, con formas redondeadas o más o menos esféricas, aumenta la plasticidad de la aleación y su resistencia a la propagación de grietas. La resistencia a la fatiga y a la rotura mejoran con tratamientos térmicos prolongados.

3.3.2.4 Homogeneizado de las barras

Las condiciones de este tratamiento respecto a temperatura y tiempo de aplicación varían, como ya hemos visto, según la aleación de las barras. En el caso de Sapa el tratamiento estándar para la aleación 6060 consiste en un tiempo de permanencia mínimo de 3 horas a una temperatura de $585 \pm 5/-10$ °C. Antes ha tenido que estar el horno calentándose 9 horas. En total, el tratamiento cuesta 12 horas.

En la siguiente tabla, vemos las diferentes temperaturas y el número de horas de permanencia en el horno de cada aleación:

Aleación	Temperatura (°C)	Tiempo (Horas)
1050	Sin tratamiento	-
1060	595	3
3103	595	5
5083	460	3
6060	585	3
6063	585	3
6106	575	4
6005	575	4
6082	565	6

Como podemos observar en el diagrama de equilibrio del Al-Mg₂Si, a medida que aumenta la concentración de Mg₂Si disminuye su temperatura de fusión, hasta llegar al mínimo eutéctico donde para una composición de 1,7% en peso de Mg₂Si, esta temperatura es de 595°C. Además, tras un tiempo de permanencia excesivamente largo o a temperaturas excesivamente elevadas comienza a producirse la coalescencia de las fases, aumentando el tamaño de las partículas presentes en el material.

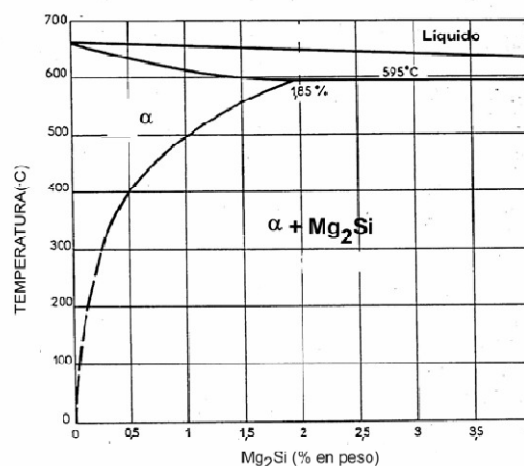


Diagrama de equilibrio Al-Mg₂Si

El conocimiento de los límites de solubilidad en este sistema aleado tiene gran importancia. El hecho de que en estado sólido se produzca una notable disminución de la solubilidad del soluto con la temperatura, permite que estas aleaciones sean susceptibles de tratamientos térmicos para mejorar las propiedades mecánicas.

Hornos de homogeneizado

La zona de fundición tiene dos hornos de homogeneizado para realizar el tratamiento térmico. Estos tienen 27 toneladas de capacidad con una potencia térmica de 1280kW, en los que se puede regular automáticamente la temperatura en dos zonas del interior. El aire en el interior de los hornos se mueve mediante unos ventiladores con un caudal de 25m³/h. Como hemos visto antes, estos hornos están en funcionamiento periodos de 12 horas, tiempo necesario para que todas las barras que están localizadas en distintos sitios del horno estén lo suficiente a la temperatura de tratamiento.

Las barras, que se colocan en el horno apiladas en filas, se separan unas de otras mediante unos separadores rectangulares de acero inoxidable. Estos hacen que el aire de los ventiladores circule entre las barras, evitando a su vez que las barras se deformen por las altas temperaturas.

Cámara de enfriamiento

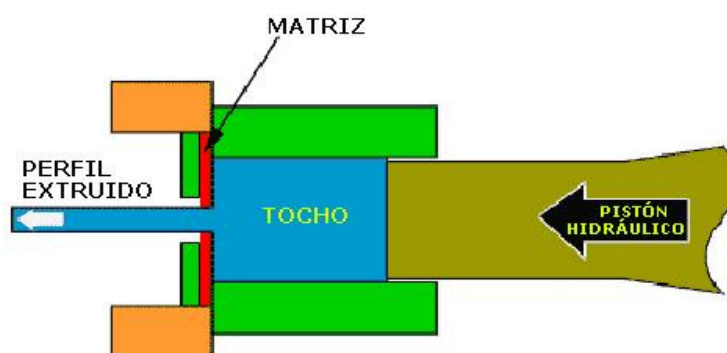
Se dispone de una cámara de enfriamiento para terminar con el tratamiento de homogeneizado. Como lo que se pretende es mantener la mayor parte del silicio y del magnesio en estado de solución sólida, el enfriamiento debe ser rápido. En principio esto provoca un aumento de la dureza del material, lo que podría parecer negativo de cara al proceso de extrusión, pero de esta manera se evita la precipitación de partículas gruesas de Mg_2Si , lo que a la larga se traduce en la obtención de perfiles con mejores propiedades mecánicas y superficiales que las encontradas en materiales enfriados lentamente.

De esta manera, se alcanza $200^{\circ}C$ al enfriarse rápidamente en aproximadamente dos horas. Para conseguir esto, se sacan las barras del interior del horno de homogeneizado en el que se haya llevado a cabo el tratamiento y se introducen en el interior de una cámara de enfriamiento.

Esta cámara tiene dos ventiladores que giran a 1000 r.p.m., proporcionando un caudal de aire de $24m^3/h$. El aire entra y sale de la cámara enfriando los perfiles a su paso. La cámara tiene las mismas dimensiones que los hornos de homogeneizado, pero se diferencian sobre todo en que los hornos están aislados térmicamente, con una recirculación continua del aire en el interior.

3.3.3 EXTRUSIÓN

La extrusión es un proceso de conformado por deformación empleado para producir productos semiacabados de gran longitud como barras, secciones huecas o sólidas, tubos, pletinas, etc. Básicamente consiste en empujar una pieza cilíndrica de un diámetro determinado a través de una matriz o hilera en el interior de un contenedor cerrado, obteniéndose una reducción de su sección. Las formas que se consiguen pueden tener distintos grados de complejidad, dependiendo de la aleación empleada y del método de extrusión.



Para la obtención de perfiles por este método se emplean prensas hidráulicas. La primera destinada a la extrusión fue construida en Inglaterra por Bramah, en el año 1810, siendo inicialmente diseñada para la fabricación de tuberías de plomo.

Durante la Primera Guerra Mundial, el proceso de extrusión del cobre y sus aleaciones experimentó importantes avances, sobre todo en Francia y Alemania. Sin embargo, al igual que ha ocurrido con otras técnicas de procesamiento del aluminio, fue la Segunda Guerra Mundial la que impulsó a ésta hasta proporcionarle la importancia que tiene hoy en día.

3.3.3.1 Corte de las barras

Mediante el empleo en una sierra de disco, se cortan las barras obtenidas durante la operación de colada para dar lugar a tochos con una longitud que viene determinada por la prensa y el tipo de perfil para el que estén determinados.

La sierra cuenta con un sistema automático para la alimentación de las barras, y un brazo mecánico que permite mover los tochos ya cortados hasta las plataformas en las que se almacenan hasta su extrusión.

3.3.3.2 Precalentamiento de los tochos

Antes de que los tochos se introduzcan en la prensa, es preciso someterlos a un calentamiento previo. Con esto se consigue que el aluminio se deforme con mayor facilidad, reduciéndose considerablemente la presión requerida para su extrusión. Esto se lleva a cabo mediante el empleo de un horno de inducción que provoca un rápido calentamiento del material de tal manera que en pocos minutos alcanza temperaturas superiores a 450°C.

Tras este tratamiento el material queda a una temperatura cercana a la de puesta en solución sólida del Mg_2Si , que se encuentra en torno a 500°C. Durante la extrusión, se generan grandes fuerzas de rozamiento que hacen que se supere ese valor, disolviéndose las partículas que habían precipitado durante el enfriamiento posterior al tratamiento de homogeneizado.

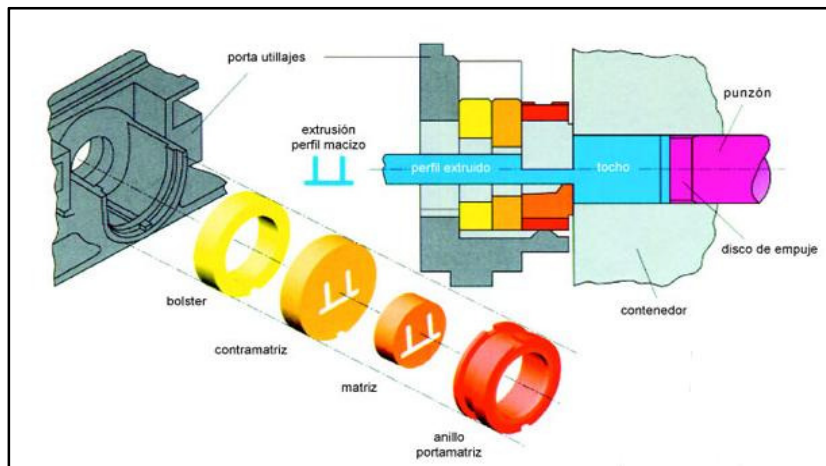
Interesa que la cantidad de Mg_2Si que queda en estado de solución sólida sea máxima, lo que a la larga conlleva la obtención de las mayores propiedades mecánicas posibles. Para conseguir esto es importante que las partículas presentes en el tocho sean lo suficientemente pequeñas como para disolverse en el escaso tiempo durante el que el material permanece a más de 500°C. De aquí la importancia de lograr una velocidad elevada de enfriamiento tras el homogeneizado.

3.3.3.3 Prensas de extrusión

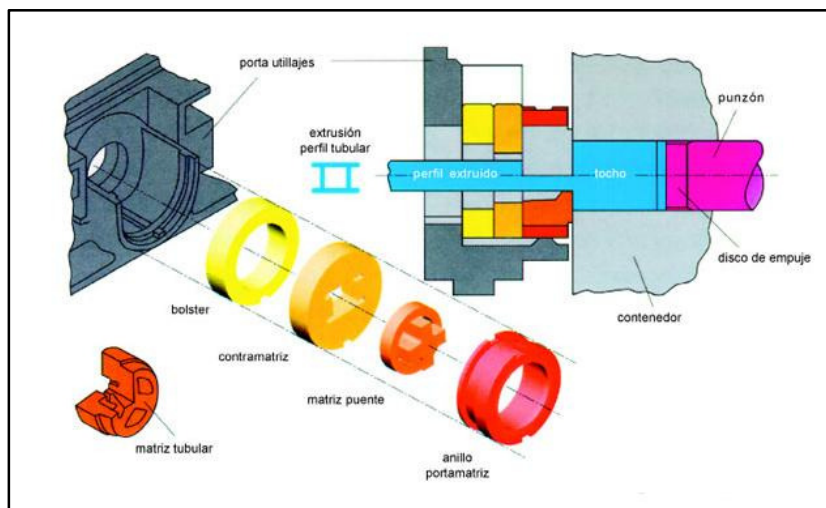
En Sapa Profiles Navarra se dispone de dos prensas. Una de ellas tiene un contenedor de 8 pulgadas de diámetro y la otra de 9 pulgadas de diámetro. La fuerza que puede desarrollar cada una de ellas es de 2.000 y 3.500 toneladas respectivamente (1Tn=1000kN de fuerza).

Todas ellas son prensas de extrusión directa. Esta es la denominación que reciben aquellas máquinas en las que se mantiene fija la hilera, mientras que el émbolo del pistón empuja al tocho a lo largo del contenedor.

En las siguientes figuras se puede ver los diferentes elementos que se utilizan en la prensa de extrusión, en dos casos: perfil sólido y perfil hueco.



Extrusión e hilera de un perfil sólido



Extrusión e hilera de un perfil hueco

La extrusión directa se desarrolla de la siguiente manera:

1. Se introduce un tocho en el contenedor mediante un brazo hidráulico.
2. Se coloca la hilera en el porta utilajes en contacto con el contenedor.
3. Proceso de extrusión: avance del vástago y empuje del tocho a través de la hilera.
4. Retroceso del pistón y el contenedor, eliminación del culote por medio de una cizalla.

En la extrusión de aluminio se emplea un pistón empujador de diámetro muy ajustado con respecto al del contenedor, de forma que durante la extrusión no hay

desplazamiento de material hacia atrás. Esto se hace así porque el aluminio, a diferencia de otros metales más pesados, tiende a adherirse a la parte interior o camisa del contenedor. De esta forma, las impurezas presentes en la corteza del material son arrancadas y finalmente quedan acumuladas en un fragmento del tocho que queda sin extruir conocido como culote, que se retira haciendo uso de una cizalla.

3.3.3.4 Sistemas de enfriamiento

Tras la extrusión, el enfriamiento debe llevarse a cabo lo suficientemente rápido como para retener la estructura de solución sólida alcanzada durante el proceso. De esta manera se evita la precipitación de partículas gruesas de Mg_2Si , lo que impediría desarrollar propiedades mecánicas máximas durante el tratamiento de envejecimiento.

Cada una de las distintas aleaciones que componen la serie 6000 tiene su propia velocidad mínima de enfriamiento. En el caso de 6060, no es necesario provocar un descenso de la temperatura tan rápido como el requerido en el caso de aleaciones con un mayor contenido en aleantes. Por este motivo, salvo en casos especiales es suficiente la aplicación de una corriente forzada de aire, que se suministra mediante una serie de ventiladores dispuestos a la salida de la prensa.

Si fuera necesario también es posible emplear agua pulverizada mezclada con aire a presión, y en casos extremos se recurre a la inmersión de los perfiles en una bañera llena de agua. En este último caso, la velocidad de enfriamiento es máxima, pero tiene el inconveniente de que las tensiones que se generan pueden llegar a producir deformaciones.

3.3.3.5 Maquinaria adicional

Tras el enfriamiento, los perfiles son sujetos por un sistema mecánico móvil provisto de mordazas conocido como “puller”, que los guía hasta que el tocho es extruido en su totalidad, manteniéndolo lo más recto posible. Su empleo es especialmente importante cuando se utilizan hileras con varios orificios, ya que en esos casos los perfiles salen a través de cada uno con distinta velocidad. El “puller” consigue igualar estas velocidades, de forma que al finalizar la extrusión todos los perfiles tienen la misma longitud.

*Puller*

A continuación, los perfiles son almacenados sobre una mesa de enfriamiento que cuenta con un sistema de ventiladores en su parte inferior, y en la que alcanzan la temperatura ambiente en el caso de que no lo hayan hecho con anterioridad.

En el momento en el que se completa el enfriamiento, se procede a una operación de estirado, con el fin de eliminar tensiones residuales y de enderezar posibles curvaturas. Si en este momento los perfiles todavía estuvieran calientes, podría verse afectado su aspecto superficial. El desplazamiento de los perfiles a través de la mesa de enfriamiento se lleva cabo mediante un sistema de brazos móviles, hasta llegar al “stretcher”, nombre con el que se conoce al dispositivo que sujeta y estira a los perfiles. Para la eliminación de tensiones es preciso aplicar una fuerza que supere al límite elástico del material hasta producir un alargamiento comprendido entre el 1 y el 3%, según el tipo de perfiles. Para enderezarlos es suficiente aplicar una fuerza que provoque un alargamiento del 0.5%.

Por último, los perfiles son desplazados a través de un tren de rodillos hasta una sierra de disco provista de un sistema de pisado que evita que se produzcan vibraciones, en la que se cortan con la longitud solicitada por el cliente.

En este momento, se dice que el material se encuentra en estado T4. Esto implica que ha sido extruido, puesto en solución, templado y enfriado. Es decir, que es apto para recibir un tratamiento de envejecimiento artificial.

3.3.4 ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL

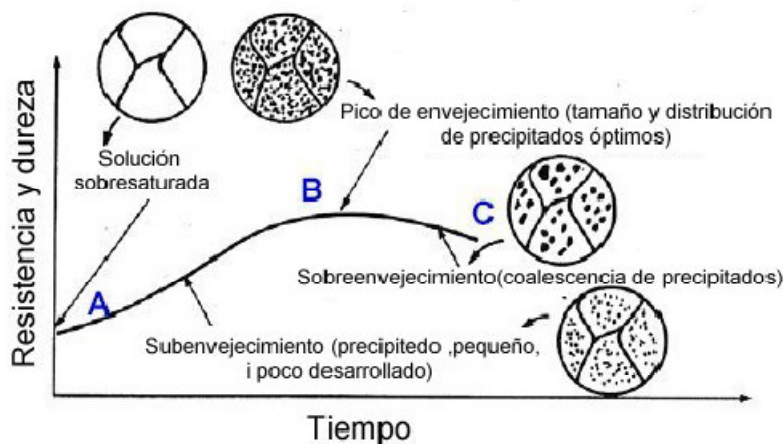
El envejecimiento constituye el último proceso al que se somete a los perfiles de la aleación 6060 previamente a su mecanizado, embalaje y distribución. Se trata de un tratamiento térmico que persigue un aumento en las propiedades mecánicas del material.

Cuando ciertas aleaciones de aluminio se mantienen a temperaturas inferiores a 250°C, después de templadas desde altas temperaturas (350 °C ó más), aumenta su resistencia mecánica.

El endurecimiento estructural por envejecimiento se descubrió en 1906, lo que condujo al desarrollo de la primera aleación industrial, el Duraluminio, en 1916.

Desde entonces, las aleaciones de aluminio endurecibles por precipitación han adquirido una importancia práctica considerable, gracias a las mejoras continuas en sus características físicas y mecánicas específicas, y a su aptitud para la conformación.

Curva de envejecimiento



Evolución esquemática de la dureza y resistencia de una aleación de aluminio de endurecimiento estructural.

3.3.4.1 Endurecimiento por precipitación

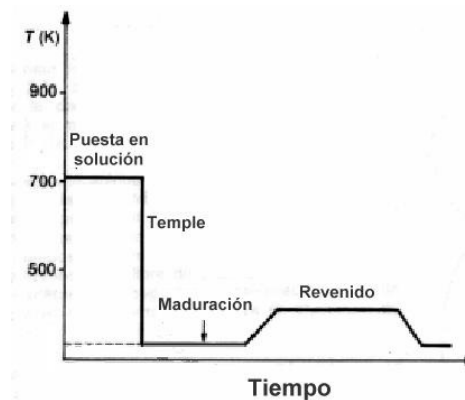
Para que una aleación pueda ser sometida a lo que se llama un endurecimiento por precipitación, antes tiene que ser tratable térmicamente.

Tal y como aparecía en los primeros capítulos, las aleaciones de aluminio empleadas en los procesos de forja se dividen principalmente en dos grupos: aquellas que son

tratables térmicamente (series 2000, 6000 y 7000) y las que no son tratables térmicamente (series 1000, 3000, 4000 y 5000).

El endurecimiento por precipitación es un proceso que se divide en dos etapas: la creación de una condición de sobresaturación mediante la puesta en solución del metal, y el posterior envejecimiento.

La clave en la metalurgia de estas aleaciones es la completa solubilidad de sus solutos a altas temperaturas, que se reduce a medida que decrecen hasta alcanzar valores muy bajos a temperatura ambiente.



Secuencia de los tratamientos térmicos

Durante el proceso de extrusión de la aleación 6060 se alcanzan temperaturas del orden de 550°C, muy por encima de los 500°C que aproximadamente limitan la solubilidad del Mg_2Si en el aluminio.

A medida que el perfil sale de la prensa, es sometido a un enfriamiento rápido que hace que el material quede constituido por una solución sólida desordenada. Esto no constituye una situación de equilibrio, sino que se dice que la aleación templada se encuentra en un estado metaestable de solución sólida supersaturada, condición en la que la microestructura es termodinámicamente inestable.

Sin embargo, a medida que transcurre el tiempo tiene lugar una difusión progresiva de los constituyentes, transformándose la microestructura en aquella que viene definida por los diagramas de fase en equilibrio. Durante este proceso, los átomos de soluto se unen para formar pequeñas partículas submicroscópicas que precipitan fuera de la solución sólida, en el interior de la matriz de los granos de la aleación.

Los precipitados que se generan proporcionan al material un aumento en la resistencia a la deformación plástica, ya que constituyen un impedimento para la movilidad de las dislocaciones presentes en la estructura interna. De esta manera, a

medida que aumenta el número de partículas que precipitan, mayores son la dureza y la resistencia mecánica.

Este fenómeno, que tiene lugar a temperatura ambiente, constituye lo que se denomina envejecimiento natural. Sin embargo, se obtienen mejores propiedades si el proceso se lleva a cabo a una temperatura próxima a los 200°C, en lo que se conoce como envejecimiento artificial. El mecanismo de ambos es similar, ya que en realidad lo que se provoca es un cambio en la cinética del proceso.

Inicialmente, la matriz de aluminio se encuentra sobresaturada de átomos de soluto, pero también de vacantes. Así, el proceso se acelera debido a que un aumento de la temperatura hace que se incremente la movilidad de dichas vacantes, lo que a su vez provoca una mayor difusión de los átomos de soluto.

Como puede verse, a medida que aumente la temperatura del tratamiento disminuye el tiempo necesario para alcanzar el pico correspondiente a las propiedades máximas, aunque también se comprueba cómo éstas son menores que las que se pueden conseguir con tratamientos prolongados a temperaturas algo inferiores.

3.3.4.2 Naturaleza de los precipitados

En el caso de las aleaciones de la serie 6000, los precipitados de Mg_2Si que se forman durante el envejecimiento tienen forma de agujas, y se disponen en las direcciones $\langle 1\ 0\ 0 \rangle$ de la estructura cúbica centrada en las caras de la matriz del aluminio.

Estas agrupaciones de átomos son semicoherentes con la red cristalina. Para ser más exactos, las partículas son coherentes con la red a lo largo de su longitud, es decir, de la dirección $\langle 1\ 0\ 0 \rangle$ de la matriz. De hecho, observaciones realizadas con microscopio óptico de transmisión muestran cómo los precipitados, aun cuando son de un tamaño muy pequeño, tienen una estructura hexagonal compacta cuyos planos son paralelos (y por lo tanto coherentes) a los planos del cubo de la matriz. En cambio, la estructura perpendicular al eje principal de la aguja, asociada a la superficie cilíndrica que separa al precipitado de la matriz que lo rodea, constituye una zona no coherente con la red cristalina. Esto provoca que ésta se expanda con el fin de que la estructura encaje, lo que origina la aparición de tensiones elevadas.

3.3.4.3. Zonas libres de precipitados (PFZ)

Es común observar zonas adyacentes a las juntas de grano en las que no ha tenido lugar la formación de precipitados de Mg_2Si . Su origen puede estar asociado a dos mecanismos distintos.

En primer lugar, si la nucleación de las fases de equilibrio tiene lugar en las juntas de grano, la concentración de soluto en las zonas adyacentes disminuye hasta hacerse nula. En este caso, se comprueba cómo la anchura de estas regiones crece al aumentar la temperatura de envejecimiento.

La otra posibilidad tiene que ver con el hecho de que las juntas de grano son un buen lugar para acoger al exceso de vacantes que se genera tras el temple, formándose un gradiente de concentración a ambos lados de la junta. La concentración local de vacantes afecta directamente a la velocidad de difusión de los átomos de soluto, y por lo tanto a la nucleación de los precipitados.

A medida que disminuye la velocidad de temple lo hace también la concentración de vacantes, y se produce un aumento en el espesor de la zona libre de precipitados.

3.3.4.4. Proceso industrial

Se dispone de dos hornos de tratamiento. Dos de ellos tienen unas dimensiones de 1790x2350x13000 mm y una potencia calorífica de 500kW, y los otros dos 2100x2650x14000 mm y 435 kW respectivamente.

El tratamiento al que se somete a la aleación 6060 consiste en 1.5 horas de calentamiento hasta alcanzar 195°C, para a continuación permanecer a esa temperatura durante 2.5 horas. En ese momento se dice que el material se encuentra en estado T6.



Horno de tratamiento

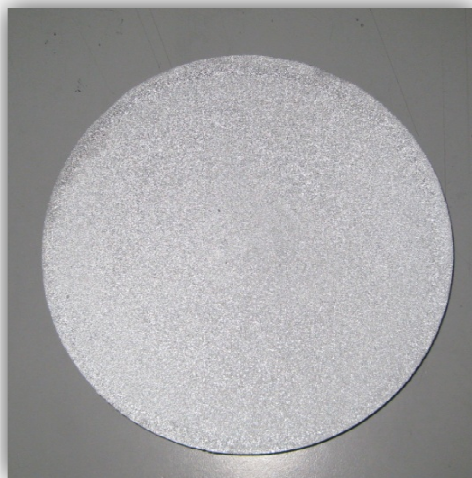
4. TÉCNICAS Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

4.1 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

De cada colada del caldo de aluminio se obtienen 12 barras de diámetro de 9 pulgadas. Para analizar las barras, cortamos en la sierra una rodaja.

4.1.1 Análisis macroscópico

Las rodajas nos sirven para hacer el análisis macroscópico de la barra. Se calienta la rodaja en la mufla hasta que alcance 160°C. A continuación, se procede a realizar el estudio macroscópico que consiste en un ataque con una mezcla de HNO_3 , HCl y agua a partes iguales, generando un revelado de la estructura de los granos, suficiente para comprobar si hay zonas en las que su distribución no es homogénea, ver aproximadamente hasta donde llega la corteza, si aparecen presolidificaciones o el tamaño de grano, aunque sin determinar su tamaño exacto.



4.1.2 Análisis microscópico

A continuación, para hacer el análisis microscópico necesitamos sacar una muestra de esa rodaja.

Para ello, la llevamos a una sierra de cinta sin fin SAMUR S-400, extrayendo un rectángulo de dimensiones 1.5x2.5mm aproximadamente. Esta sierra funciona con una hoja STARRET de 3/8" (9.52mm) de ancho, 0.56mm de espesor y 8 dientes por pulgada.

El trocito de la rodaja lo vamos a empastillar para darle más consistencia y poder agarrarlo mejor a la hora de pulir, analizar en el microscopio, etc.

Empastilladora

Se introduce el trozo que hemos cortado para hacer la muestra en la empastilladora, que es una prensa electro-hidráulica automática SIMPLIMET 2000 de BUEHLER, con unidad de molde de 1 1/4” de diámetro, controlada por microprocesador, en la que se introduce la temperatura, presión y tiempo deseado.

Se echa baquelita por encima hasta cubrirla. La empastilladora calienta la baquelita hasta alcanzar los 150°C y con una presión de 290 bares durante 8 minutos, transcurrido este tiempo la muestra empieza a enfriarse gracias a una camisa externa por la que circula agua de modo automático durante 3 minutos más. El resultado es una probeta en la cual se puede ver la muestra por un lado para ser pulida.



Pulidora

Cuando ya tenemos la muestra empastillada, se procede a pulirla. Para ello, utilizamos la pulidora-desbastadora VECTOR de BUEHLER con plato de 8” de diámetro (203mm), velocidad variable de 50 a 500 r.p.m. y toma de agua y otros fluidos. Este equipo cuenta con un cabezal de pulido PHOENIX-BETA de BUEHLER controlado por un microprocesador, capacitado para sujetar 4 muestras al mismo tiempo, en el que se introducen variables como tiempo de pulido, velocidad, sentido de giro del cabezal respecto al plato, presión y la adición de agua.

Realizando una serie de pasos, la muestra quedará lisa y limpia para analizarla en el microscopio. Los pasos son los siguientes:

Superficie	Sentido Giro	Abrasivo	Fuerza (N)	Velocidad(r.p.m.)	Tiempo (min)
Lija 320	A favor	SiC + Agua	20	300	1
Lija 1200	A favor	SiC + Agua	20	150	1
Paño UltraPad	A favor	Suspension de diamante 9 μm	20	150	5
Paño Trident	A favor	Suspension de diamante 3 μm	25	150	4
Paño Chemomet	En contra	Suspensión coloidal de SiO_2	20	150	2

Cuando se realiza un paso, hay que limpiar bien la muestra con jabón y agua, frotando con el dedo o con un algodón blanco. Si no se limpia bien, quedarán porquerías que se verán en el análisis microscópico dificultando la visibilidad.

4.2 DEFINICIÓN DE VARIABLES A CARACTERIZAR

El control de los cambios realizados lo llevamos a cabo analizando las propiedades de la microestructura del tocho. Las propiedades que vamos a analizar son:

- Composición química (4.2.1)
- Aspecto superficial del tocho (4.2.2)
- Grosor de la zona de segregación (4.2.3)
- Tamaño de grano en la superficie y en la estructura general (4.2.4)
- Otros posibles defectos (4.2.5)

El grado de la calidad de tocho se determinará de forma simple en una escala de 0 a 5:

- Grado 5: calidad alta o la mejor calidad que se puede conseguir con equipos y procedimientos modernos.

- Grado 0: Calidad subestándar, desviaciones de la calidad normal demasiado grandes, se deben introducir precauciones especiales.

La calidad de tocho final es la media de los grados obtenidos en las 14 medidas de propiedades diferentes (de las cuales vamos a analizar las cinco nombradas anteriormente). Estas propiedades se dividen en 4 subgrupos donde en cada uno de ellos está compuesto por propiedades similares del tocho. El grado final se calcula de la siguiente manera:

Paso	Principio
1	Se mide cada propiedad y los resultados se convierten a su correspondiente grado.
2	Se calcula la media de cada uno de los subgrupos (redondeo normal).
3	Se calcula el grado final del tocho realizando la media de cada subgrupo (subgrupos sin redondear, grado final con redondeo normal).
4	Siempre que una de las propiedades sea de grado 0, el grado final será 0.

4.2.1 Composición química

La composición química de las aleaciones se rige por la norma UNE-537-3. En ella, podemos ver cuál es el porcentaje en peso que tiene que tener cada elemento para que la aleación sea considerada una 6060.

De esta manera tenemos que:

Aleación	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Cr	Zn	Ti
6060	0.1-0.3	0.3-0.6	0.35-0.6	0.10	0.10	0.05	0.15	0.10

Para analizar la composición química se necesita un espectrómetro, además de tener la muestra (seta) bien torneada o fresada para poder dar los tres chispazos encima de ella (como está explicado dentro de la Introducción en Corrección de la composición).



Seta con los tres chispazos del espectrómetro

Se miden las composiciones de los elementos y con la media de los tres chispazos, se calcula el grado para cada uno de ellos siguiendo las siguientes reglas:

C_L y C_H son los límites inferiores y superiores de las especificaciones requeridas.

C_X es la composición obtenida con el espectrómetro y σ es la desviación estándar típica que depende de la aleación y los elementos. Las desviaciones estándar típicas de cada elemento y para cada aleación se muestran en la siguiente tabla:

Aleación	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Cr	Zn	Ti
6060	0,005	0,007	0,006	0,0004	0,0003	0,0001	0,001	0,0003

La concentración del Na se da como información.

Para el cálculo del grado de grado de la composición utilizaremos la siguiente tabla:

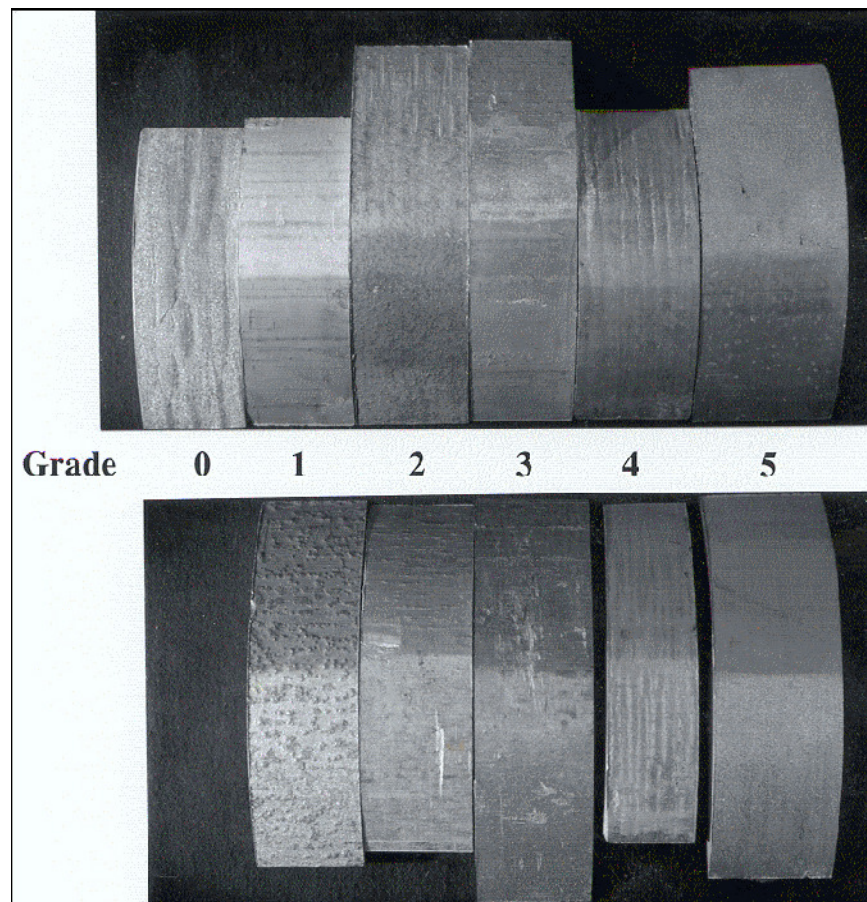
GRADO	FÓRMULA
5	$C_L + 2\sigma \leq C_X \leq C_H - 2\sigma$
4	$C_L + \sigma \leq C_X \leq C_H - \sigma$
3	$C_L \leq C_X \leq C_H$
2	$C_L - \sigma \leq C_X \leq C_H + \sigma$
1	$C_L - 2\sigma \leq C_X \leq C_H + 2\sigma$
0	$C_X < C_L - 2\sigma$ ó $C_X > C_H + 2\sigma$

Se elegirá el grado mayor que satisfaga la regla seleccionada.

Cx es la media de las 3 mediciones en el espectrómetro. Se redondean hasta el mismo decimal de σ para cada elemento.

4.2.2 Aspecto superficial del tocho

Tenemos la rodaja cortada del tocho para poder comparar su superficie exterior con la de las siguientes fotos:



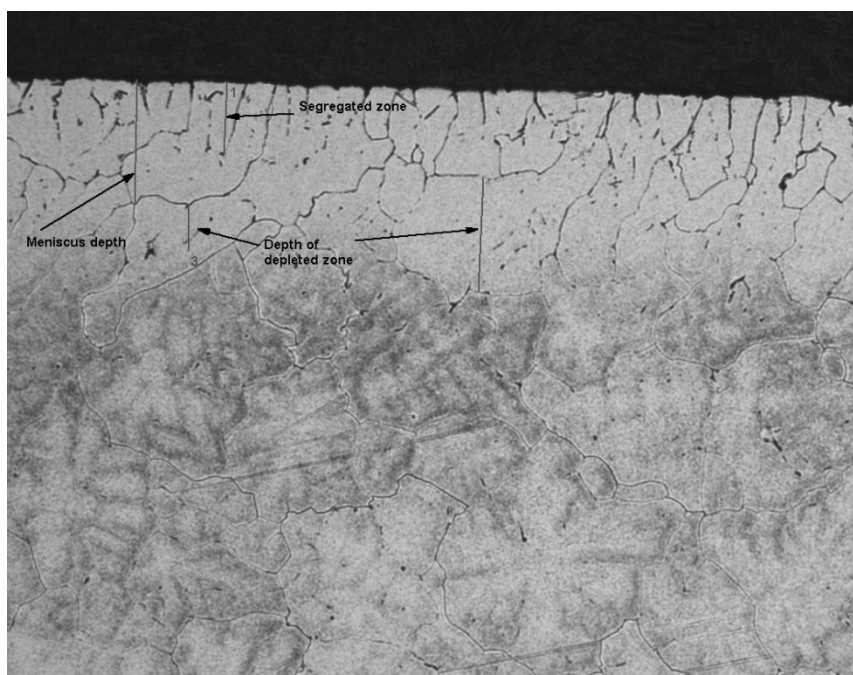
4.2.3 Grosor de la zona de segregación

4.2.3.1 Fundamentos teóricos

Cuando se estudia la corteza de un tocho es común observar una zona de pequeño espesor que presenta características especiales, ya que la concentración de precipitados

y de fases intermetálicas es mucho más elevada de lo que lo es en el interior. A ese fenómeno se lo conoce como segregación inversa, y es causa de la diferenciación de tres zonas en la parte exterior del material:

1. Zona enriquecida en elementos aleantes, correspondiente a la más externa (zona de segregación inversa).
2. Zona empobrecida en elementos aleantes, en contacto con la anterior.
3. Zona de composición natural (Estructura general).



Este hecho puede explicarse de la siguiente manera:

En primer lugar, cuando el metal líquido entra en contacto con el molde, solidifica rápidamente pero con un espesor pequeño. Las dendritas que se forman en esta primera fase tienen un bajo contenido en aleantes, mientras que la parte líquida se enriquece en estos elementos. A continuación, la contracción que se genera debido a una solidificación tan brusca crea canales interdendríticos por los que fluye, forzado por la presión metalostática, el líquido cargado de intermetálicos de punto de fusión menor al del aluminio. Por último, este líquido es reemplazado por otro de composición normal.

Así la primera zona, en la corteza, se forma con el líquido enriquecido que fluye a través de las dendritas. La segunda está compuesta por las dendritas bajas en aleantes y

el aluminio fundido que ha reemplazado al que ha fluido hacia la zona de la corteza. Y la última zona, la más interna, es la creada a partir de metal fundido de composición normal.

Una zona de segregación poco profunda constituye un requisito indispensable para poder reducir la longitud del culote de desecho que se genera tras la extrusión de un tocho. Además, el que exista una zona con un gran número de fases intermetálicas y de precipitados gruesos de Mg_2Si afecta negativamente a la extrusionabilidad y al acabado superficial de los productos.

El espesor de la segregación inversa depende en gran medida de los parámetros empleados durante el proceso de colada, siendo necesario controlar el enfriamiento para poder reducir su magnitud. Una de las maneras de conseguirlo es trabajar manteniendo un nivel bajo de aluminio en el interior de los moldes.

Existen diseños que reducen el contacto directo entre el aluminio líquido y la superficie del molde, lo que conlleva una disminución del espesor de la segregación inversa, e incluso algunos fabricantes proclaman ser capaces de eliminarla completamente mediante el empleo de tecnología denominada Airslip. En cambio el sistema de colada utilizado en Sapa Profiles Navarra, en el que siempre existe ese contacto, provoca que la aparición de este fenómeno sea inevitable, por lo que el esfuerzo debe ir encaminado a obtener el menor espesor posible.

4.2.3.2 Aplicación práctica

La zona de segregación (sz) se define como el grosor de la capa enriquecida de la superficie. Si está presente la forma del menisco (m) se califica separadamente. La que nos dé el menor grado es la que se utiliza para determinar el grado.

Para poder analizar la segregación inversa tenemos que atacar la muestra con ácido fluorhídrico HF al 0,5% durante 20 segundos.

Profundidad de la zona de segregación:

GRADO	6060	Unidad
5	$sz \leq 0,02$	mm
4	$0,02 < sz \leq 0,05$	mm
3	$0,05 < sz \leq 0,10$	mm
2	$0,10 < sz \leq 0,15$	mm
1	$0,15 < sz \leq 0,20$	mm
0	$0,20 < sz$	mm

4.2.4 Tamaño de grano

4.2.4.1 Fundamentos teóricos

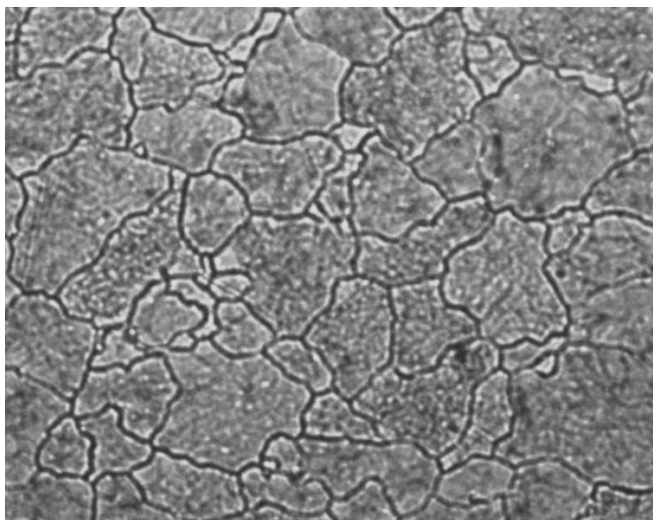
Proceso de formación de los granos

A medida que un metal líquido se enfría por debajo del punto de fusión, comienza la nucleación de pequeños cristales que crecen a diferentes velocidades en cada dirección de la red.

En el caso del aluminio y del resto de los metales con estructura cúbica centrada en las caras, las direcciones preferenciales para el crecimiento son las $\langle 100 \rangle$ del cubo.

Cuando el aluminio contiene disueltos átomos de soluto, generalmente con un tamaño distinto al suyo, éstos no se ajustan bien en la red cristalina que se está formando y quedan en el líquido residual. Se dice entonces que esos átomos han sido microsegregados hacia las regiones interdendríticas. De este modo, el sólido resultante no tiene una composición uniforme, sino que está microsegregado en una escala que depende del tamaño de las dendritas. Así mismo, este tamaño depende de las condiciones de enfriamiento, que a su vez vienen determinadas por el método de colada.

El material solidificado tras la operación de colada consiste por lo tanto en colonias de dendritas separadas por juntas de grano, en las que los granos están microsegregados. Un tratamiento térmico del material justo por debajo de su punto de fusión (homogeneizado) permite que los gradientes existentes en la composición del soluto desaparezcan mediante procesos de difusión y que se formen granos con composición uniforme. En condiciones normales, este tratamiento no conlleva cambios en el tamaño de grano del material.



Granos de la microestructura

Un tamaño fino de grano viene determinado por la velocidad de enfriamiento, pero especialmente por la adición de un afinante de grano que proporciona un número elevado de núcleos para la formación de cristales.

Si el proceso de afinado no es el adecuado pueden aparecer granos de gran tamaño a lo largo de una dirección preferencial de crecimiento, fenómeno que se produce con mayor facilidad si existe un gradiente térmico pronunciado entre el líquido y el sólido. Incluso aplicando un correcto afinado pueden aparecer granos de este tipo aislados, en zonas donde una distribución pobre del metal pueda causar la intrusión de líquido caliente. Esta zona con estructura y distribución de partículas diferentes puede ocasionar diferencias en la totalidad de los productos extruidos una vez anodizados, y por este motivo debe evitarse su formación.

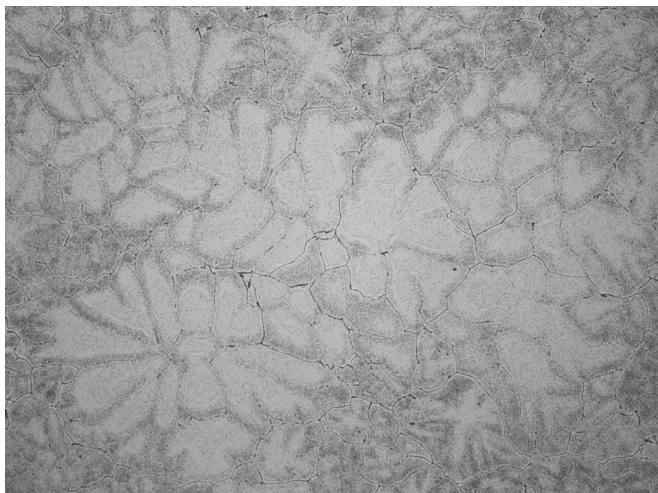
Tamaño de grano grande (RECRISTALIZACIÓN)

Los cristales flotantes o recristalización hace que aparezcan unos granos muy brillantes de gran tamaño que se pueden ver a simple vista al hacer el análisis macroscópico. Esta recristalización hace que los perfiles rompan en las zonas en las que aparece ésta.

La recristalización se puede reducir o evitar teniendo en cuenta principalmente dos cuestiones:

- La fuerza del pistón en la extrusión que viene dada por los parámetros de extrusión, además de tener en cuenta el diseño de la hilera.

- Dentro de la microestructura, hay que aumentar la fuerza de retardo. Esta fuerza se determina mediante la composición química del tocho de aluminio y prácticas de homogeneizado.



Cristales flotantes

Afinantes de grano (una Solución al problema)

Es bien conocido que el empleo de ciertos compuestos adicionales al metal fundido permite conseguir un grano más fino. En el caso del aluminio, normalmente se ha empleado el titanio unido a ciertas cantidades de boro.

Estos afinantes están compuestos principalmente por dos fases de alto punto de fusión: TiAl_3 y TiB_2 . La proporción entre ellas varía según la composición. La relación en peso de la fase TiB_2 es de 2.2:1, pero esta composición no se presenta en ningún producto comercial, sino que generalmente presentan valores mayores de titanio que faciliten la formación de TiAl_3 . Las proporciones en las que es posible adquirir estos compuestos suelen ser 3Ti:1B, 5Ti:1B, 10Ti:1B, 25Ti:1B y 50Ti:1B. En los casos en los que el afinante se agrega en el horno en forma de tabletas o pequeños lingotes suele preferirse el empleo de altas concentraciones de titanio, ya que el boro puede contaminar las paredes. En cambio si se añade en forma de varilla justo antes del filtrado final es posible emplear mayores cantidades de boro, como ocurre en el caso de Sapa, donde para la aleación 6060 se emplea un afinante del tipo 3Ti:1B. Aunque también en este caso conviene ser precavido, ya que elevados niveles de estos elementos pueden dar lugar a la aparición de inclusiones de TiB_2 .

Existen tres teorías que intentan explicar cómo actúa el afinante para producir un tamaño de grano pequeño:

1. *Teoría peritética*: cualquier afinante de grano con un contenido en titanio superior en 2.2 veces al de boro se combina con el aluminio para formar la fase TiAl_3 . Este compuesto se disolvería rápidamente dejando libre al titanio, que sería el responsable de la formación de los nucleantes.

2. *Teoría de la partícula*: el TiB_2 , al contrario que el TiAl_3 , es una fase estable. Una vez formado no se disuelve ni se desintegra en las condiciones de fusión del aluminio, pero se supone constituye un nucleante heterogéneo muy eficiente para la fase primaria del aluminio.

3. *Teoría del caso (hulk)*: este mecanismo requiere la presencia de ambas fases. Sobre las partículas de TiB_2 se formaría una envoltura o funda de TiAl_3 durante la solidificación que daría lugar a la aparición de numerosas y pequeñas celdas peritéticas. En otras palabras, la nucleación del TiAl_3 comenzaría sobre las partículas de TiB_2 , que serían las causantes del afinado de grano.

Hoy en día no se sabe cuál de los tres mecanismos predomina en la solidificación de las aleaciones comerciales de aluminio, pero lo cierto es que los afinantes que proporcionan mejores resultados en el ámbito de la extrusión son aquellos que contienen un exceso de titanio, quedando cantidades de este elemento libres tras formarse el TiB_2 . Estos datos pueden inducir a pensar que los mecanismos peritético y del casco son los predominantes.

Otros afinantes que están en fase de experimentación son aquellos que forman el grupo de las tierras raras. Todavía no se emplean en el campo de la extrusión, sino en el de la electrónica y elementos conductores de precisión. Parece que el itrio, lantano, praseodimio, neodimio, samario, gadolinio y disprosio consiguen impedir el crecimiento de grano, aunque causan problemas en la superficie de los conductores de precisión, siendo el holmio y el erbio mucho más prometedores en este campo.

Beneficios derivados de un tamaño de grano pequeño y uniforme

Un concepto ampliamente arraigado en el diseño de todo tipo de aleantes de alta resistencia es el empleo, dentro de lo posible, de un tamaño de grano pequeño. En

general, esto asegura un incremento de la dureza, de la tensión de rotura y del límite elástico, y ayuda a conseguir un buen mecanizado.

Otra razón por la que la obtención de un tamaño de grano pequeño resulta importante se debe a que el desplazamiento de los planos atómicos se ve dificultado por las juntas de grano, que son regiones desordenadas, y por la presencia de partículas de otras fases dispersas en la matriz lo que en conjunto contribuye a un aumento de las propiedades mecánicas del material.

Además del tamaño, una estructura homogénea de los granos implica una menor segregación de los elementos aleantes, y por lo tanto una mejor respuesta del material a los tratamientos térmicos. Por último, se consigue que defectos tales como la porosidad o las partículas intermetálicas queden uniformemente distribuidas, resultando de este modo menos perjudiciales.

En las aleaciones con un gran número de aleantes como la 6060, el tamaño de grano no constituye un problema muy grave, ya que por los mecanismos de cristalización se genera una gran cantidad de pequeñas fases que favorecen una nucleación abundante. Las complicaciones son mayores en el caso de las aleaciones de pureza elevada, como es el caso de las que componen la serie 1000, para la que resulta imprescindible aplicar técnicas de afinado.

4.2.4.2 Aplicación práctica

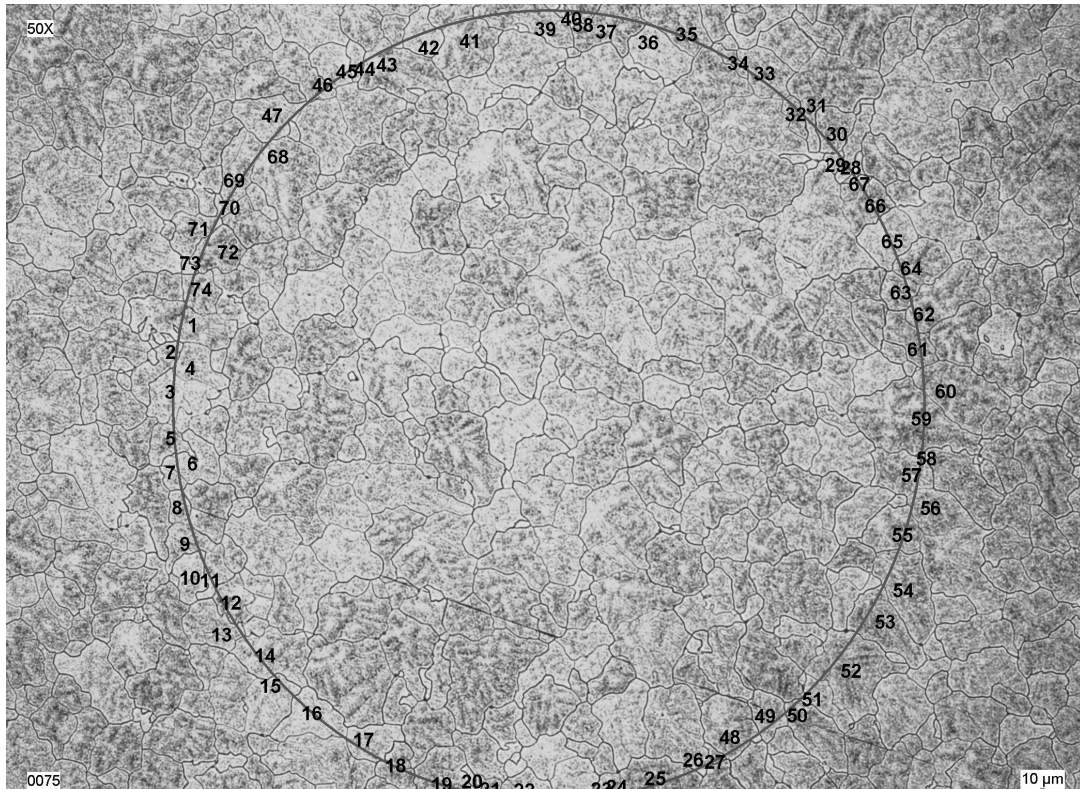
Para poder hallar el tamaño de grano, hay que atacar la muestra con ácido fluorhídrico al 50% durante 20 segundos.

El tamaño de grano (g) se mide en la zona de estructura general a 30mm de la superficie del tocho usando el método lineal de intercepción.

Se dibuja un círculo de radio R y se cuentan todos los granos que atraviesa. Si el grano está tangente a la línea, entonces contamos como medio grano.

El tamaño de grano se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Tamaño de grano} = g = \frac{2 \cdot \Pi \cdot R}{n^{\circ} \text{ granos}}$$



Para calcular el grado que tenemos del tamaño de grano miramos la siguiente tabla:

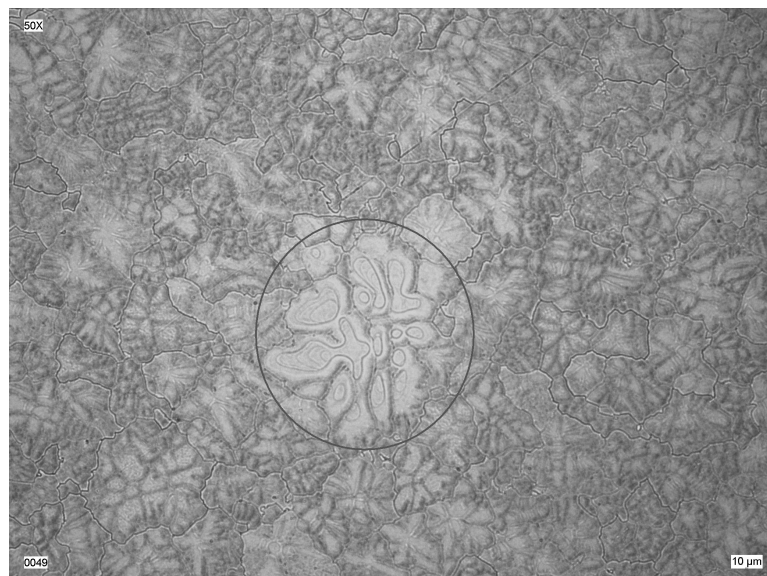
GRADO	6060	Unidad
5	$g \leq 120$	μm
4	$120 < g \leq 135$	μm
3	$135 < g \leq 150$	μm
2	$150 < g \leq 200$	μm
1	$200 < g \leq 250$	μm
0	$250 < g$	μm

Se analiza la diferencia de tamaño de grano entre la superficie y la estructura general. De esta manera, el tamaño de grano se mide a 30mm de la superficie si no hay variaciones extremas entre la estructura general y la zona cortical. Si las hubiese, entonces se mide el tamaño de grano a las siguientes profundidades (respecto a la superficie del tocho): 1, 5, 10, 15, 20 y 30mm. Se deberán comentar las variaciones extremas, las cuales nos darán un grado final de 0.

Si la diferencia del tamaño de grano entre la estructura general y en la zona cortical es mayor de $50\mu\text{m}$ o la zona cortical es mayor de 30mm , entonces el grado final será 0.

4.2.5 Otros posibles defectos

La presencia de cristales flotantes y/o emanación de cristales nos lleva a un grado 0. Esto es así porque la recristalización hace que los perfiles rompan en la zona donde ha aparecido, como se ha explicado en el punto anterior.



Conjunto de Cristales flotantes

5. PARÁMETROS DE COLADA Y PLAN DE EXPERIMENTACIÓN

En las pruebas que se han realizado, se han modificado una serie de variables en la colada. A continuación, se describe cada uno de los parámetros, y se explica la importancia que tiene su variación.

5.1 PARÁMETROS DE COLADA

5.1.1 Velocidad de colada

Se trata de un parámetro determinante en la velocidad de solidificación del metal, por lo que resulta necesario hacer diversas consideraciones:

Si la velocidad es demasiado baja, aumenta el enfriamiento en el molde, y con ello crece la posibilidad de que se produzcan pliegues fríos o incluso de que se peguen los flotadores. En cambio, si la velocidad es excesiva, el cráter líquido formado durante la solidificación alcanza una profundidad muy elevada, lo que puede desembocar en la aparición de grietas, que más tarde podrían encontrarse en los perfiles extruidos. De este modo una práctica común consiste en arrancar con una velocidad de colada lenta, para ir aumentándola a medida que avanza la colada.

Por último, se debe tener en cuenta que la velocidad de colada es función del diámetro del molde, trabajándose con valores menores a medida que aumentan las dimensiones de las barras que se pretenden colar.

5.1.2 Caudal de agua de refrigeración

A medida que el metal fundido entra en contacto con el molde, solidifica inmediatamente formando una costra que retiene al aluminio líquido en el interior. Esto se conoce como enfriamiento primario. A continuación, la cortina de agua que envuelve a la barra apenas ésta abandona el molde provoca la solidificación completa del interior, lo que constituye el enfriamiento secundario.

Este último es el que verdaderamente determina la velocidad de enfriamiento de la mayor parte del material, ya que el calor desprendido por el aluminio en la solidificación es eliminado principalmente por el agua de refrigeración. De este modo, para la obtención de una buena estructura interna del metal es importante que el enfriamiento secundario tenga lugar en unas condiciones adecuadas, lo que hace que cobren relevancia parámetros tales como el caudal y la temperatura del agua.

Normalmente se recomienda trabajar con una temperatura del agua de 15-20°C, aunque en muchas ocasiones ésta viene determinada por las condiciones climáticas.

Hay estudios que demuestran que la transmisión de calor entre la superficie de la barra y el agua es máxima cuando la temperatura está comprendida entre 100 y 240°C. En este intervalo se produce la formación de burbujas, generándose una agitación violenta que favorece la transferencia de calor.

Por debajo de la temperatura indicada el agua no hierve, lo que impide la formación de burbujas, y la transmisión de calor tiene lugar únicamente por conversión natural. Por otro lado, si la temperatura es excesiva se crea una capa estable de vapor sobre la superficie de la barra, lo que también provoca un descenso de la transferencia de calor.

Esto quiere decir que el caudal de agua empleado en la refrigeración de las barras es un parámetro muy a tener en cuenta, ya que tanto un exceso como un defecto son perjudiciales. Para conseguir que este proceso se lleve a cabo de manera óptima, se recomienda operar con un caudal que oscile entre 1,42 y 1,77 litros por minuto y centímetro de circunferencia del molde.

5.1.3 Nivel del líquido en el molde

Se debe trabajar con un nivel de aluminio lo más bajo posible, de manera que disminuya la zona de roce con el molde y se consiga una mejora en el aspecto superficial de las barras. Pero sobre todo es importante porque pierde relevancia el enfriamiento primario a favor del secundario. El inconveniente que tiene esta forma de actuación es que niveles del metal muy bajos aumentan el riesgo de que se produzca la pérdida de alguna barra.

5.1.4 Temperatura del metal

La temperatura del aluminio líquido al llegar al distribuidor suele encontrarse en condiciones normales comprendida entre 685 y 715°C. Por debajo de esta temperatura aumenta el riesgo de que el aluminio se pegue a los flotadores o de que se produzca un taponamiento de las toberas. Por el contrario, una temperatura demasiado elevada podría llegar a estropear el molde o a hacer que se escurra aluminio líquido, generándose un riesgo de explosión en el caso de que quedase agua atrapada bajo una capa de metal fundido. Además, se debe tener en cuenta el efecto ya comentado de la temperatura sobre la oxidación y la absorción de los gases.

5.2 PLAN DE EXPERIMENTOS

5.2.1 Molde en mal estado (detonante)

El momento en el que se consideró hacer pruebas para cambiar la calidad de tocho fue a finales de 2008, ya que se observó que las barras que salían tenían una segregación inversa muy grande, con las consecuencias que ello conlleva.

Al analizar el molde vieron que estaba desgastado por lo que no lubricaba bien.

Análisis de una prueba

Los datos que se recogieron de esa prueba fueron:

DÍA	HORA	Nº COLADA	ALEACIÓN	DIÁMETRO
24-11-08	12:00	17563	6060	9"

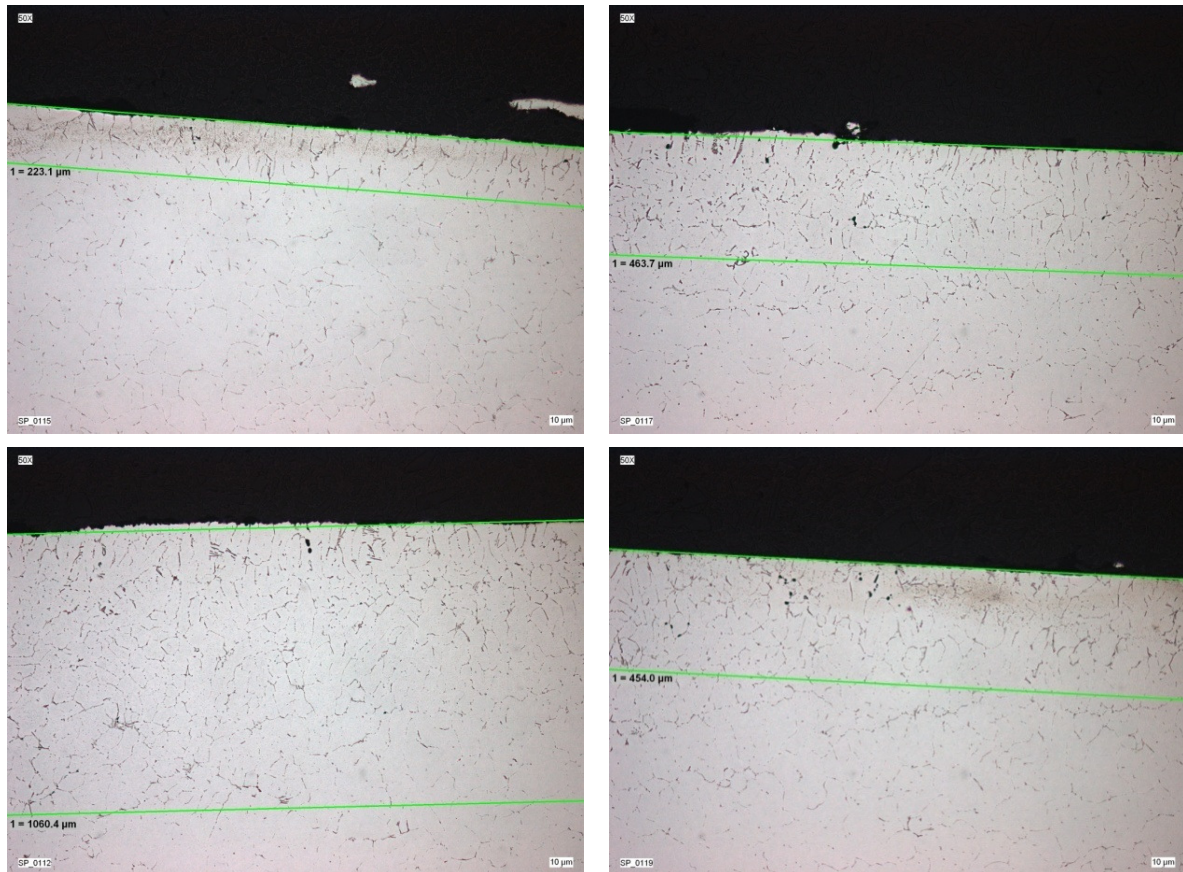
COMPOSICIÓN:

	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Ti	Cr	Zn	Na
V.medido	0,16	0,47	0,39	0,051	0,015	0,012	0,003	0,009	0,0001

PARÁMETROS DE COLADA:

Caudal Cl (l)	Caudal Ar (m ³ /h)	Rpm Sniff	Tª Colada (°C)	Aporte Varilla Titanio (cm/mm)	Velocidad mesa
70	2,2	330	725	44	74

Se realiza un análisis microscópico y entre los resultados, llama la atención las medidas de la segregación inversa ya que sus valores van de 155 a 1180µm. Estos valores pertenecen a varias muestras de una misma rodaja.



Fotografías de la segregación inversa, donde aparecen las medidas impresas

Las medidas que se recogieron de las 10 fotografías realizadas y analizadas fueron:

SEGREGACIÓN INVERSA (µm)										REGULAR			VALOR MEDIO	471.1	
										IRREGULAR		X			
MEDIDAS				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VALOR MÁXIMO	1179.8
50x	X	100x		154.6	185.8	201.1	1060.4	223.1	463.7	508.8	454.4	279.4	1179.8	VALOR MÍNIMO	154.6

Como podemos ver las medidas son irregulares ya que distan mucho entre ellas (más de 50 μm). Estos datos no corresponden a lo que sería una microestructura ideal para la extrusión. Hay que ponerle remedio a esta situación.

5.2.2 Situación actual

Hemos cogido una barra de una colada cualquiera (19203) homogeneizada y le hemos cortado una rodaja para analizarla, y ver cómo está la microestructura.

La colada se ha realizado a una velocidad de colada de 89 mm/min, con el programa número 1.

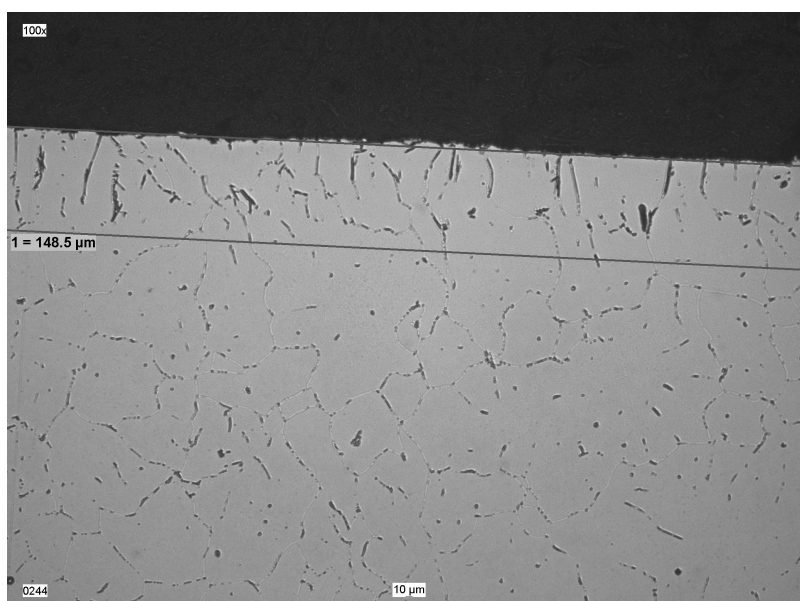
De esta manera, de la rodaja se ha cortado una muestra para analizarla. Se ha seguido los mismos pasos que se hacen siempre: empastillar, pulir, analizar en el microscopio.

Al mirar la muestra en el microscopio nos llama especialmente la atención la segregación inversa, ya que antes de medirla parece que va ser grande.

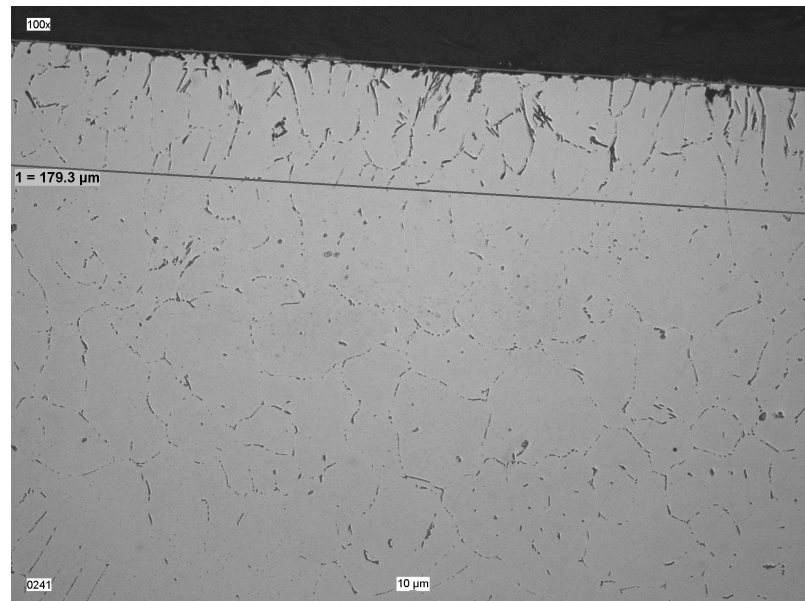
Para medir la segregación inversa, primero atacamos la muestra con ácido fluorhídrico HF al 0,5% durante 20 segundos. Así, al sacar unas fotos con el programa informático IM-500 se distinguirá más fácilmente.

Los datos obtenidos de la segregación inversa son:

SEGREGACIÓN INVERSA (μm)										REGULAR		X	VALOR MEDIO	158.0	
										IRREGULAR					
MEDIDAS				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VALOR MÁXIMO	179.3
50x		100x	X	175.2	150.4	150.9	154.2	159.5	153.3	179.3	158.0	150.8	148.5	VALOR MÍNIMO	148.5



Segregación inversa mínima



Segregación inversa máxima

El grado obtenido es de 1, un valor no muy bueno para este parámetro.

5.2.3 Benchmark

El ansia de mejora de Sapa ha hecho que se compare con sus competidores directos. Esto nos ha permitido conocer la situación de los tochos de esos competidores, viendo en ellos mejoras en algunos aspectos, en otros no son buenos pero en eso no nos fijamos. Son en las buenas propiedades las que queremos igualar e incluso mejorar.

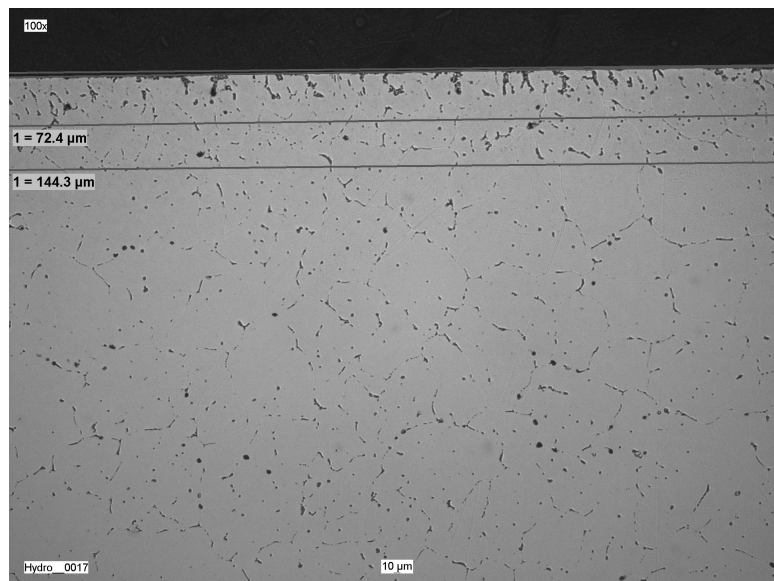
De esta manera, se han analizado los tochos de las siguientes empresas:

➡ Hydro

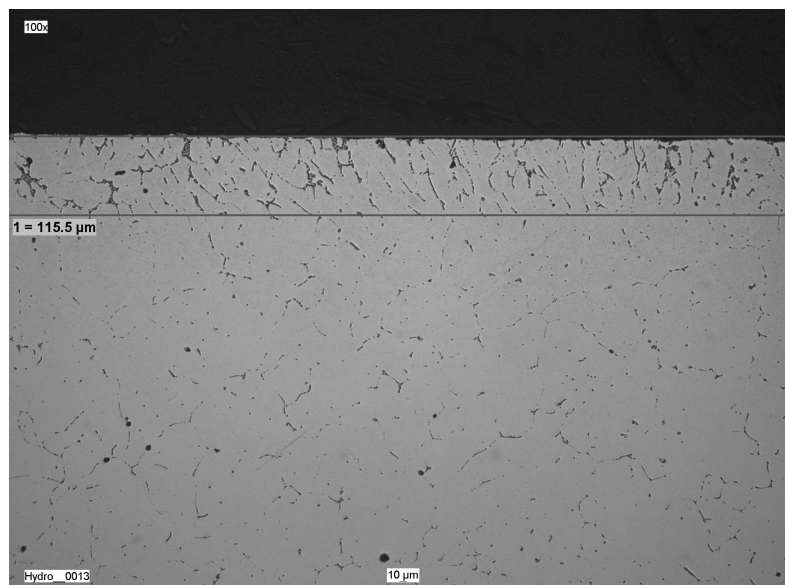
Se ha analizado un tocho adquirido de Hydro cuya referencia de colada es 26784. Al hacerlo hemos visto que su segregación inversa es menor que la que tenemos nosotros.

Tienen un grado 3 en segregación inversa ya que tiene una medida media de 0,084mm.

SEGREGACIÓN INVERSA (μm)											REGULAR		X	VALOR MEDIO	84.7
											IRREGULAR				
MEDIDAS				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VALOR MÁXIMO	115.5
50x		100x	X	85.7	108.3	115.5	78.5	73.5	76.8	72.4	83.5	76.8	75.7	VALOR MÍNIMO	72.4



Segregación inversa mínima



Segregación inversa máxima

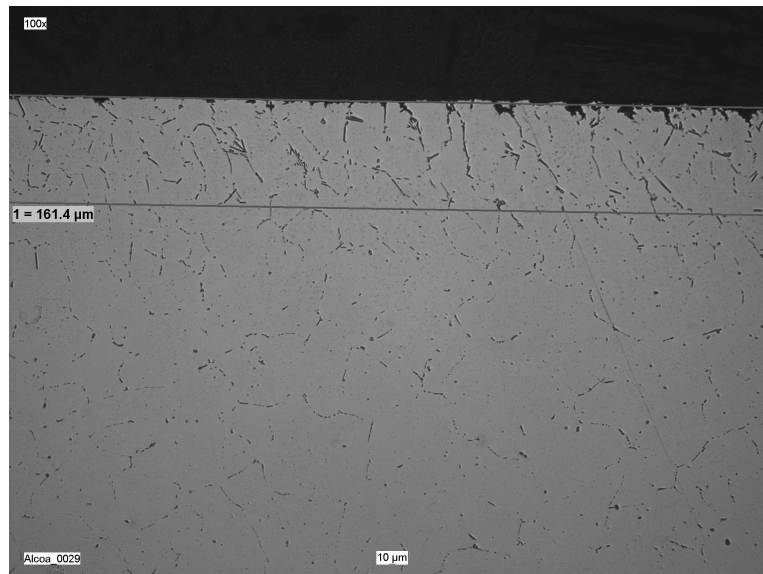
Además, la calidad superficial es muy buena (orden 4) ya que sólo tiene unos pequeños pliegues superficiales.

➡ Alcoa La Coruña

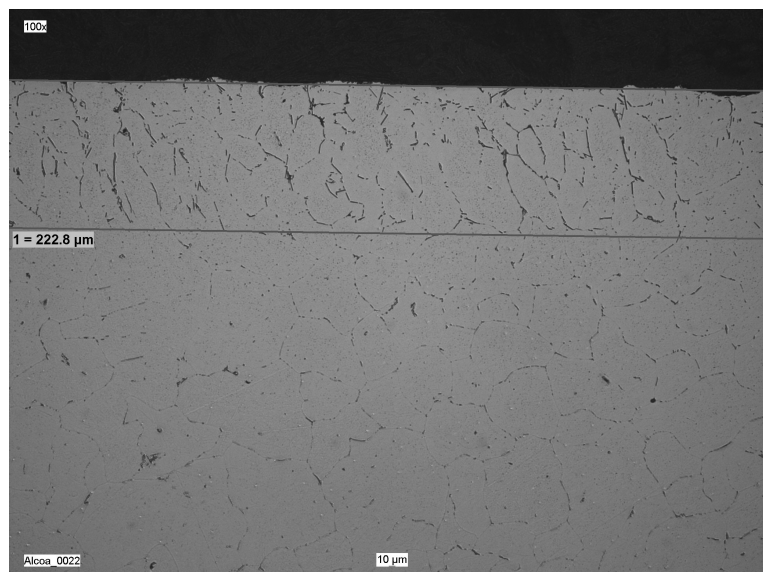
En primer lugar, se analizó una barra de Alcoa con referencia de colada 58519. Y después, analizamos otras dos muestras extraídas de dos barras más de Alcoa La Coruña.

En la muestra de la colada 58519, tienen un grado 1 en segregación inversa ya que tiene una medida media de 0,184mm. Esta medida algo mayor de la que tenemos en nuestro tocho.

SEGREGACIÓN INVERSA (µm)										REGULAR			VALOR MEDIO	183.9	
										IRREGULAR		X			
MEDIDAS				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VALOR MÁXIMO	222.8
50x		100x	X	165.3	222.8	166.9	171.8	213.4	199.0	173.5	182.9	161.4	182.4	VALOR MÍNIMO	161.4



Segregación inversa mínima



Segregación inversa máxima

La calidad superficial de esta barra es buena (orden 3), teniendo unos pequeños puntos en la superficie.

En la siguiente tabla aparecen los valores medidos de las barras de estas dos empresas. Así, podemos ver cómo se encuentra nuestra competencia en los parámetros que queremos mejorar, como son el valor de la segregación inversa y el aspecto superficial.

	HYDRO (C-26784)		ALCOA (C-58519)	
	Medición	Grado	Medición	Grado
	GRADO DE HOMOGENEIZADO			
Fracción fases	0,58%	5	0,20%	5
Esfereicidad de AlFeSi	96,10%	4	93,80%	4
Dispersión AlFeSi	3533 l/mm2	1	2336 l/mm2	3
	ESTRUCTURA GENERAL			
Tamaño grano	76 micras	5	105 micras	5
Inclusiones	0 OM	5	420 OM	0
Dispersión Mg ₂ Si	Pocos y dispersión uniforme	3	Muchos y dispersiones	4
Presencia Mg ₂ Si > 2 micras	5,2 l/mm2	5	10,4 l/mm2	5
Particula mas grande de Mg ₂ Si	2,3 micras		2,3 micras	
	SUPERFICIE DEL TOCHO			
Porosidad	0%	5	0%	5
Aspecto superficial	Pequeños pliegues	4	Pequeños puntos	3
Segregación	0,084 mm	3	0,184 mm	1
Menisco	0,219 mm	2	0,306 mm	1
Zona de agotamiento	0 mm	5	0 mm	5
Presencia de cristales flotantes	No		No	
Presencia de Mg ₂ Si > 4 micras	No	5	No	5
Numero de Mg ₂ Si > 2 micras/mm2	1 > 2 micras (max 2,6 micras)		15 > 2 micras (max 3,1 micras)	

De las otras dos barras de Alcoa A Coruña se sacaron dos muestras (A y B) que también analizamos para ver si daban unos valores mejores que los de la barra anterior.

De esta manera, se sacaron 10 fotografías de cada muestra en el microscopio y se analizaron con el programa informático, dando como resultado los siguientes datos:

Muestra A

1. Composición química:

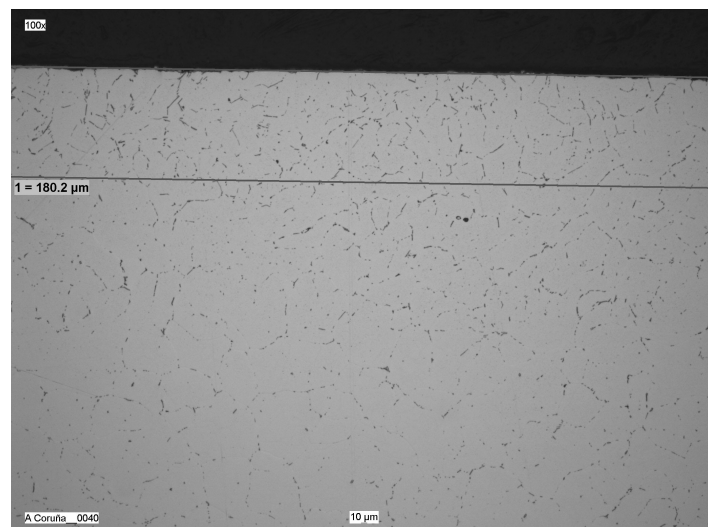
Valores medidos	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Cr	Zn	Ti	Na (ppm)
Valor análisis	0,15	0,45	0,42	0,026	0,008	0,003	0,002	0,012	0,0004
Valor certificad.	0,16	0,45	0,40	0,026	0,009	<0,01	0,003	-----	0,0003

2. Segregación inversa:

SEGREGACIÓN INVERSA (μm)										REGULAR			VALOR MEDIO	156,0	
										IRREGULAR		X			
MEDIDAS				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VALOR MÁXIMO	180,2
50x		100x	X	162,5	149,6	150,9	138,2	125,9	161,3	180,2	165,7	157,5	168,5	VALOR MÍNIMO	125,9



Segregación inversa mínima



Segregación inversa máxima

Muestra B

1. Composición química:

Valores medidos	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Cr	Zn	Ti	Na (ppm)
Valor análisis	0,15	0,46	0,41	0,026	0,009	0,003	0,003	0,006	0,0004
Valor certificad.	0,16	0,45	0,40	0,026	0,009	<0,01	0,003	-----	0,0003

2. Segregación inversa:

SEGREGACIÓN INVERSA (μm)										REGULAR			VALOR MEDIO	143,4	
										IRREGULAR		X			
MEDIDAS				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VALOR MÁXIMO	182,9
50x		100x	X	110,0	144,8	106,7	148,1	158,1	182,9	132,7	171,4	162,0	117,2	VALOR MÍNIMO	106,7



Segregación inversa mínima



Segregación inversa máxima

En la siguiente tabla aparecen todos los parámetros medidos, y coloreados los aspectos que estamos comparando:

La Coruña (C-20740)				
La Coruña A			La Coruña B	
Medición	Grado	Medición	Grado	
GRADO DE HOMOGENEIZADO				
Fracción fases	0%	5	0%	5
Esfereicidad de AlFeSi	93,8%	4	95,4%	5
Dispersión AlFeSi	-	-	-	-
ESTRUCTURA GENERAL				
Tamaño grano	68 micras	5	90 micras	5
Inclusiones	6 OM	1	1 OM	5
Dispersión Mg ₂ Si				
Presencia Mg ₂ Si > 2 micras	25 l/mm ²	0	5 l/mm ²	3
Particula mas grande de Mg ₂ Si	3,7 micras		2,1 micras	
SUPERFICIE DEL TOCHO				
Porosidad	0%	5	0%	5
Aspecto superficial	Ondulaciones	4	Ondulaciones	4
Segregación	0,16 mm	1	0,14 mm	2
Menisco	-	-	-	-
Zona de agotamiento	-	-	-	-
Presencia de cristales flotantes	Si	0	Si	0
Presencia de Mg ₂ Si > 4 micras	4.6 micras	0	4,6 micras	0
Numero de Mg ₂ Si > 2 micras/mm ²	200 n ^o /mm ²		102 n ^o /mm ²	

Se han obtenido en las dos barras unos mejores resultados respecto a segregación inversa y su aspecto superficial ha dado en ambos casos un grado mayor.

6. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Se han realizado una serie de pruebas variando diferentes parámetros que se explican a continuación.

6.1 PRUEBA 1

Objetivo

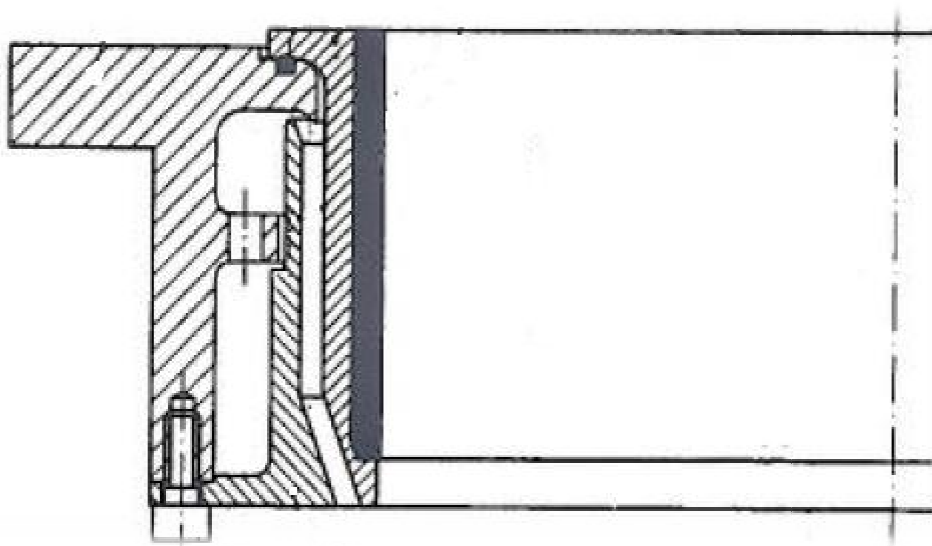
Mejorar la calidad de la zona cortical del tocho mediante un cambio de molde, el cual tiene la parte superior refractaria y tras el grafito hay una cámara con aceite para lubricarlo constantemente.

Metodología

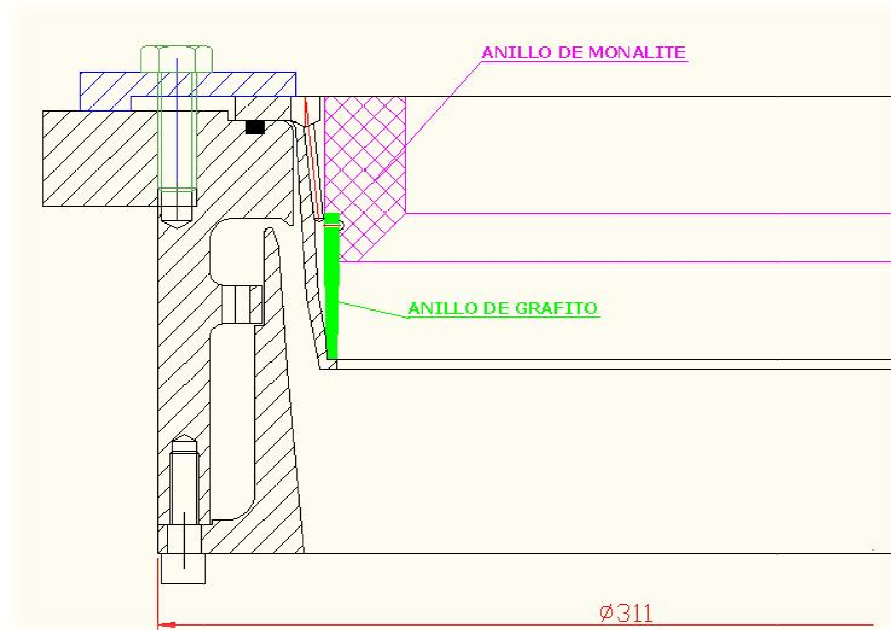
El molde que teníamos hasta ahora se ha modificado para intentar mejorar la calidad del tocho. Así, se pretende mejorar el flujo de aceite por lo que se han realizado los siguientes cambios:

- Se modifica la cámara del molde.
- Se añaden unos agujeros que atraviesan el anillo de monalite para aumentar la lubricación.
- La altura de la caja de agua se rebaja 1mm.

También, se pretende aumentar la inclinación con la que salía el agua del molde y chocaba contra el aluminio, pensando que esto va a producir un enfriamiento más rápido, mejorando la microestructura.



Molde y caja de agua anterior



Molde y caja de agua nuevos

Se realiza una colada (19829) poniendo el molde de diseño nuevo en la huella número 11 en la mesa de 9". Temperatura de colada 726°C, Velocidad de colada 89 mm/min, Velocidad de adición de Titanio 55cm/min. Resto de parámetros normales.

Una vez realizada la colada, separamos dos barras:

- La barra numero 11: Barra realizada con el molde de diseño nuevo.
- La barra numero 12: Barra de referencia con molde habitual.

De ambas barras se toman muestras (rodajas) del inicio de colada.

Se realizan análisis macroscópico y microscópico.

- Macroscópico: Ataque con ácidos para revelado macroscópico de grano: Intentaremos localizar presolidificaciones e identificar la zona cortical.
- Microscópico: Ataque con HF al 0,5% para revelar la segregación inversa y ataque con HF al 50% para revelado de grano, zona empobrecida y menisco.

Resultados

Una vez finalizada la colada se observan visualmente las barras obtenidas y nos encontramos con lo siguiente:

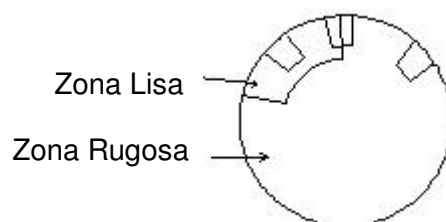
- Barra 12 de referencia: Tiene un aspecto homogéneo en toda la barra. Es rugosa con una especie de granos pequeños repartidos por toda la superficie.

- Barra 11 del molde de diseño nuevo: Los primeros 400mm de la barra tiene un aspecto muy bueno, liso y sin ningún tipo de rugosidad como la encontrada en el molde 12. A partir de los 400mm, hay un cambio en el aspecto superficial, volviéndose rugosa como la barra de referencia excepto una porción de arco la cual se mantiene lisa durante toda la barra.

Viendo esto, se decide coger las siguientes muestras:

Muestra Barra 12 (Referencia): Se cortará una rodaja del inicio de colada de la barra 12, se hará el examen macroscópico y una vez realizado éste, cogeremos una muestra de la corteza para prepararla para examen microscópico en sentido longitudinal de la colada.

Muestras Barra11: Cogeremos dos rodajas del inicio de colada: Una antes de los 400mm de aspecto totalmente liso y otra después de los 400mm de aspecto rugoso parcialmente liso. A las dos rodajas se les hará examen macroscópico. De la segunda de ellas cogeremos tres muestras para examen microscópico:



- Una de la zona lisa en sentido longitudinal a la colada.
- Otra de la zona rugosa en sentido longitudinal a la colada.
- Y una tercera en la zona de transición entre la zona lisa y la rugosa en sentido transversal a la colada.

Análisis de los datos obtenidos

- Examen macroscópico:

- En la barra de referencia no se aprecian ninguna presolidificación.
- En la barra realizada con el molde de diseño nuevo se aprecian presolidificaciones en las dos rodajas (antes y después de los 400mm).

- Examen microscópico:

Cogemos las cuatro muestras y realizamos 10 fotografías de cada una de ellas con el microscopio. De esta manera, podemos medir la segregación inversa de cada muestra:

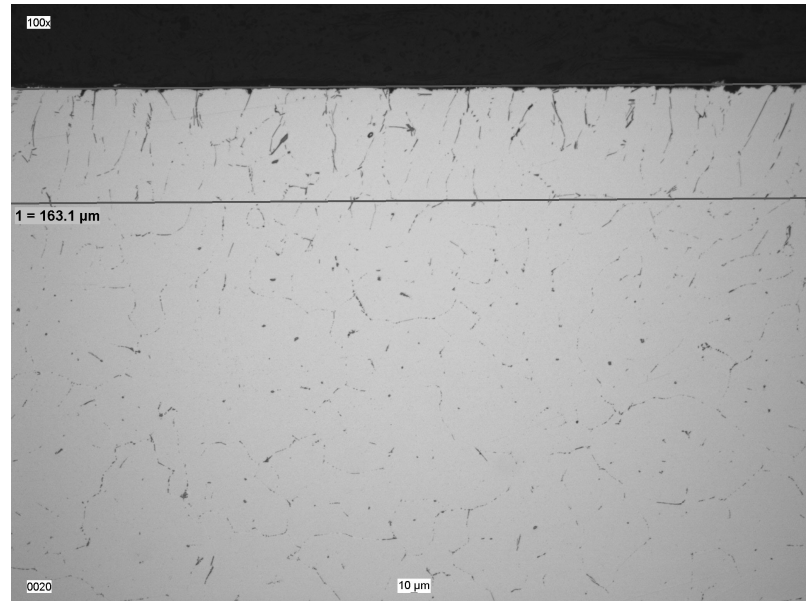
Del molde de nuevo diseño:

- En la muestra de la zona lisa (sentido longitudinal a la colada) se obtienen los siguientes resultados:

SEGREGACIÓN INVERSA (μm) Molde Nuevo - Aspecto Bueno										REGULAR		X	VALOR MEDIO	147.9	
										IRREGULAR					
MEDIDAS				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VALOR MÁXIMO	163.1
50x		100x	X	138.7	137.1	141.0	145.9	134.3	157.5	157.0	146.5	158.1	163.1	VALOR MÍNIMO	134.3



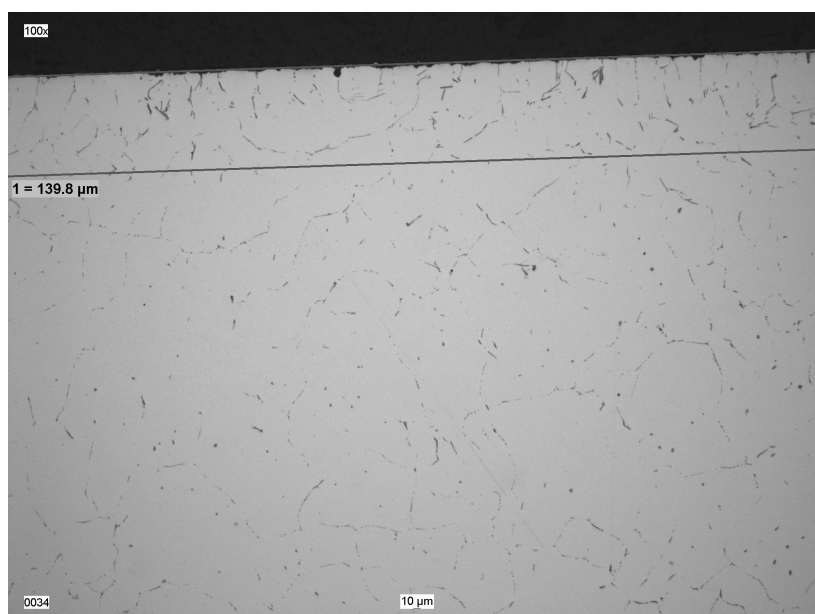
Segregación inversa mínima



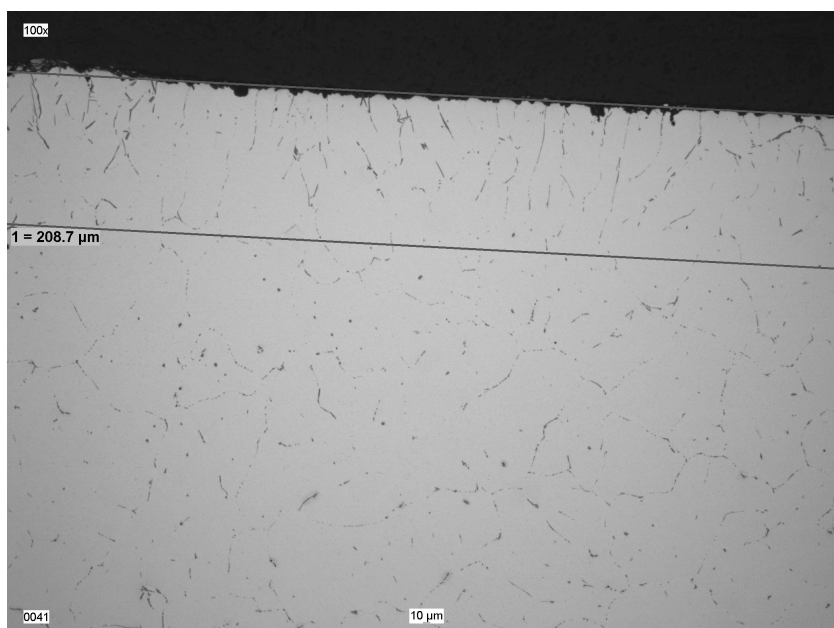
Segregación inversa máxima

- En la muestra de la zona de transición entre la zona lisa y la rugosa (sentido transversal a la colada), obtenemos

SEGREGACIÓN INVERSA (μm) TRANSICION											REGULAR			VALOR MEDIO	171.4
											IRREGULAR		X		
MEDIDAS				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VALOR MÁXIMO	208.7
50x		100x	X	176.1	147.4	139.8	175.2	165.8	162.0	147.0	190.1	201.6	208.7	VALOR MÍNIMO	139.8



Segregación inversa mínima



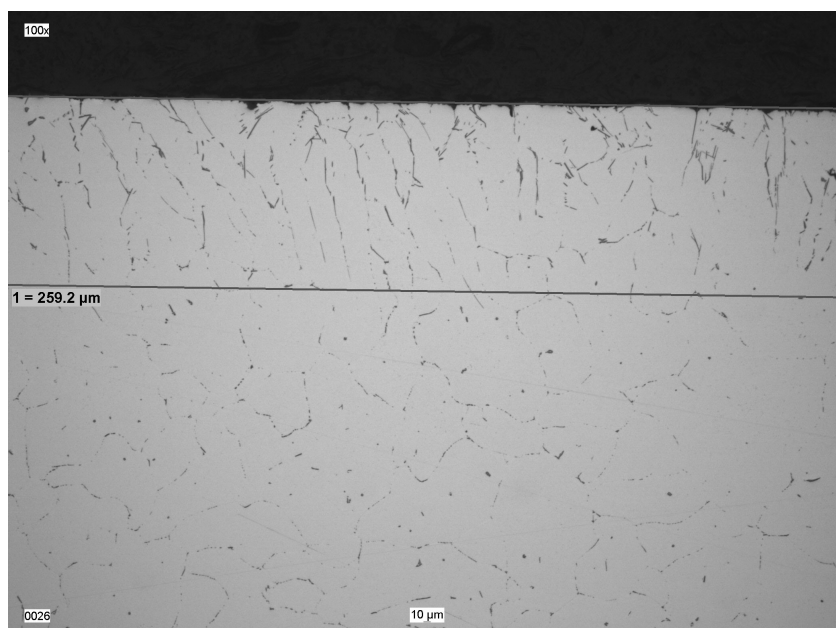
Segregación inversa máxima

- En la muestra de la zona rugosa (sentido longitudinal a la colada), vemos que:

SEGREGACIÓN INVERSA (μm) Molde Nuevo - Aspecto Malo										REGULAR			VALOR MEDIO	206.0	
										IRREGULAR		X			
MEDIDAS				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VALOR MÁXIMO	259.2
50x		100x	X	190.0	186.1	218.3	207.8	237.1	259.2	190.1	164.1	197.3	210.0	VALOR MÍNIMO	164.1



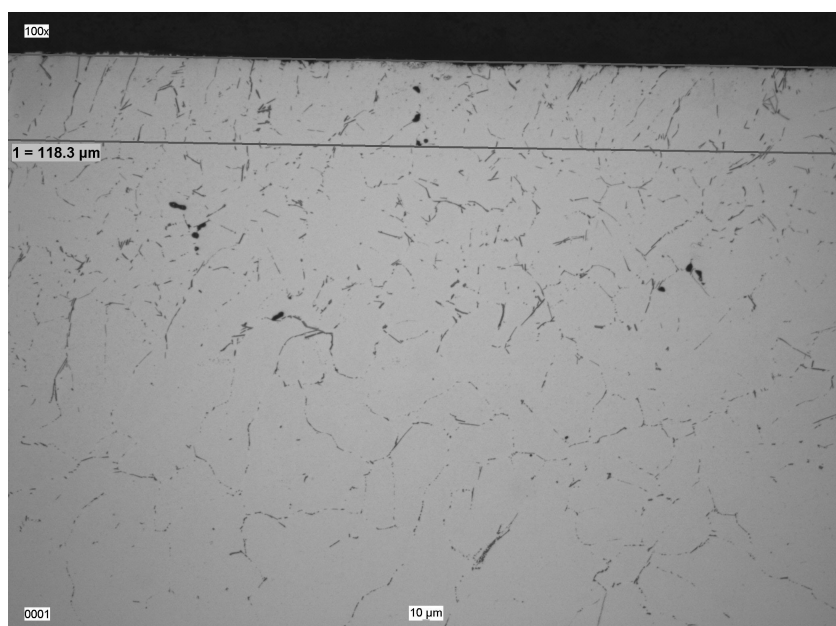
Segregación inversa mínima



Segregación inversa máxima

Del molde de referencia, cogemos la muestra en sentido longitudinal a la colada y medimos la segregación inversa:

SEGREGACIÓN INVERSA (µm)										REGULAR			VALOR MEDIO	286,3	
										IRREGULAR		X			
MEDIDAS				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VALOR MÁXIMO	511,2
50x		100x	X	118,3	221,1	216,1	228.3	295,7	322,3	377,5	263,0	511,2	309,4	VALOR MÍNIMO	118,3



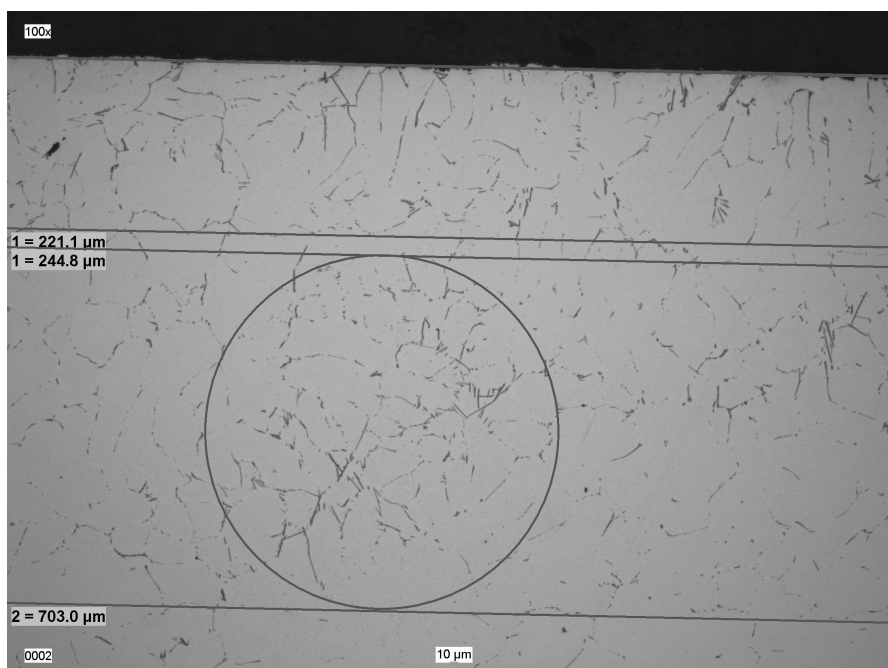
Segregación inversa mínima



Segregación inversa máxima

Observamos que no hay una separación clara entre la segregación inversa y la zona de rápido enfriamiento, por lo que en algunas fotografías no está claro cuál es la medida de la segregación inversa:

En la fotografía 2 se aprecia un apelotonamiento de fases entre $244,8\mu\text{m}$ y $703,0\mu\text{m}$.



En la fotografía 3 también se observan dos frentes que podrían ser la segregación inversa, a $216\mu\text{m}$ y a $486,9\mu\text{m}$.

En la fotografía 4 tenemos los siguientes frentes: a $228,3\mu\text{m}$ y a $483,1\mu\text{m}$.

En la fotografía 6 hay un posible segundo frente a $461\mu\text{m}$.

Y en la fotografía 10 observamos dos frentes a $309,0\mu\text{m}$ y a $441\mu\text{m}$.

Por lo que el valor medio de la segregación inversa en la barra de referencia podría ser mayor del que aparece en la tabla.

Conclusiones

Hemos visto que en la zona lisa la segregación inversa es menor que en la zona rugosa, además de ser regular, al contrario que la zona rugosa que es irregular.

En la muestra de la zona de transición se ha observado que la segregación inversa aumenta a medida que se pasa a la zona rugosa.

Después de haber atacado las muestras por segunda vez (esta vez con HF al 50%), se han podido observar presolidificaciones (“Floating Crystals”) en las muestras del molde de nuevo diseño. Por el contrario, en la muestra del molde de referencia no había presolidificaciones.

6.2 PRUEBA 2

Objetivo

Continuar con la mejora de la calidad de la zona cortical del tocho, variando la velocidad respecto a la prueba 1, para ver cómo funciona el nuevo molde a velocidades altas.

Metodología

Se realiza una colada (19865) poniendo el molde de diseño nuevo en la huella número 11 en la mesa de 9". Temperatura de colada 718°C, Velocidad de colada 120 mm/min, Velocidad de adición de Titanio 55cm/min. Resto de parámetros normales.

Una vez realizada la colada, separamos dos barras:

- La barra numero 11: Barra realizada con el molde de diseño nuevo.
- La barra numero 12: Barra de referencia con molde habitual.

De ambas barras se toman muestras (rodajas) del inicio de colada.

Se realizan análisis macroscópico y microscópico.

Resultados

Una vez finalizada la colada se observan visualmente las barras obtenidas y nos encontramos con lo siguiente:

- Barra 12 de referencia: Tiene un aspecto homogéneo en toda la barra. Es rugosa con una especie de granos pequeños repartidos por toda la superficie.
- Barra 11 del molde de diseño nuevo: Ocurre una situación similar a la prueba 1, alrededor de los primeros 400mm de la barra tiene un aspecto muy bueno, liso y sin ningún tipo de rugosidad como la encontrada en el molde 12. A partir de esa distancia, hay un cambio en el aspecto superficial, volviéndose rugosa como la barra de referencia excepto una porción de arco la cual se mantiene lisa durante toda la barra.

Viendo esto, se decide coger las siguientes muestras:

Muestra Barra 12 (Referencia): Se cortará una rodaja del inicio de colada de la barra 12, se hará el examen macroscópico y una vez realizado éste, cogeremos una muestra de la corteza para prepararla para examen microscópico en sentido longitudinal de la colada.

Muestras Barra11: Cogemos una rodaja del inicio de colada en la parte lisa. A la rodaja se le hace examen macroscópico.

Análisis de los datos obtenidos

- Examen macroscópico:

- En la barra de referencia no se aprecian ninguna presolidificación.
- En la barra realizada con el molde de diseño nuevo se aprecian presolidificaciones en toda la barra.

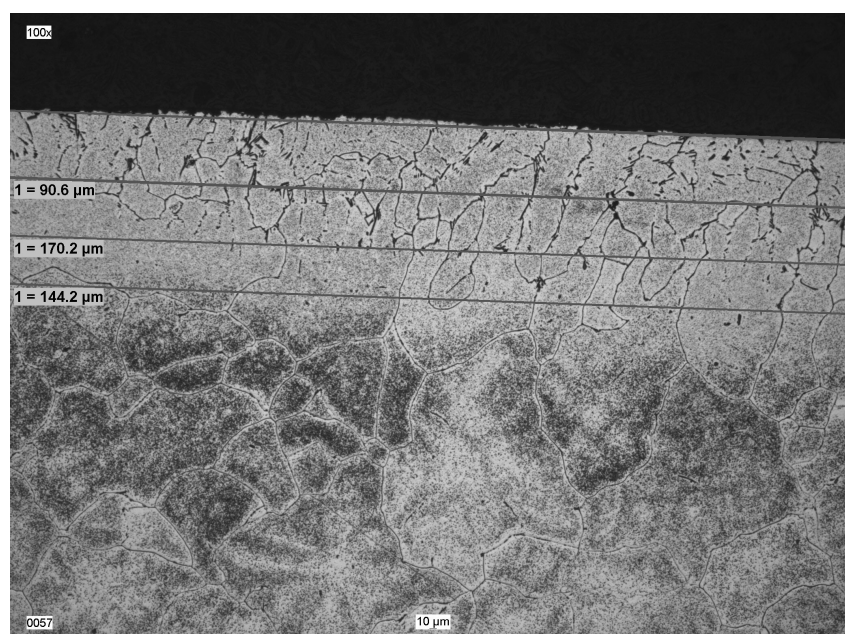
- Examen microscópico:

Cogemos las dos muestras y realizamos 10 fotografías de cada una de ellas con el microscopio. De esta manera, podemos medir la segregación inversa de cada muestra:

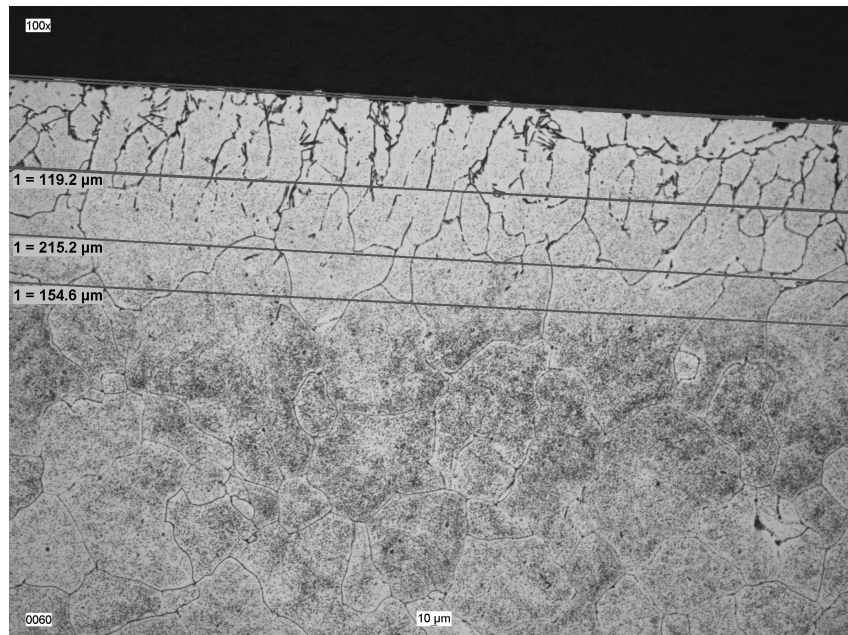
Del molde de nuevo diseño:

Cogemos la muestra de la zona lisa en sentido longitudinal a la colada, donde se obtienen los siguientes resultados:

SEGREGACIÓN INVERSA (μm) Molde Nuevo - Aspecto Bueno										REGULAR		X	VALOR MEDIO	99.9	
										IRREGULAR					
MEDIDAS				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VALOR MÁXIMO	119.2
50x		100x	X	110.5	91.4	90.6	102.9	92.1	119.2	93.9	103.3	99.4	96.1	VALOR MÍNIMO	90.6



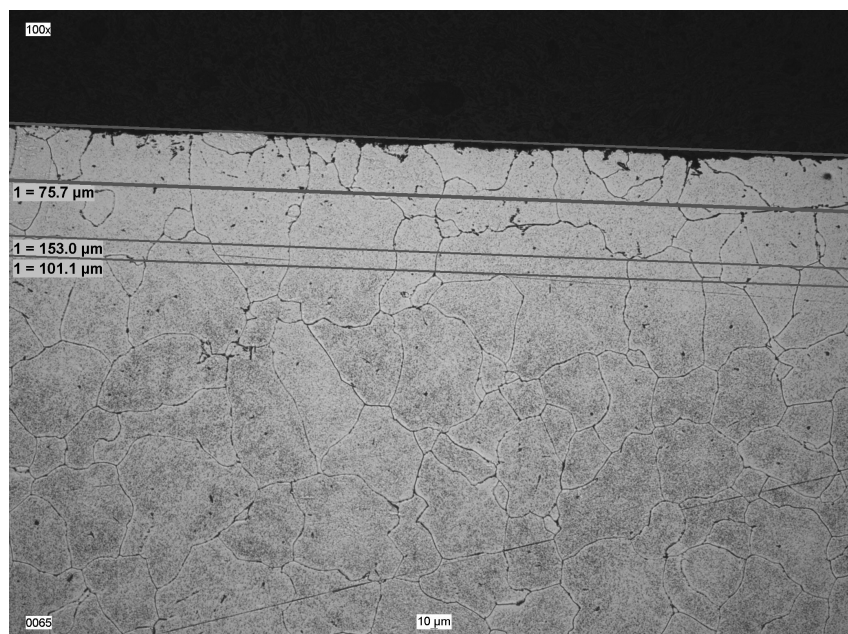
Segregación inversa mínima



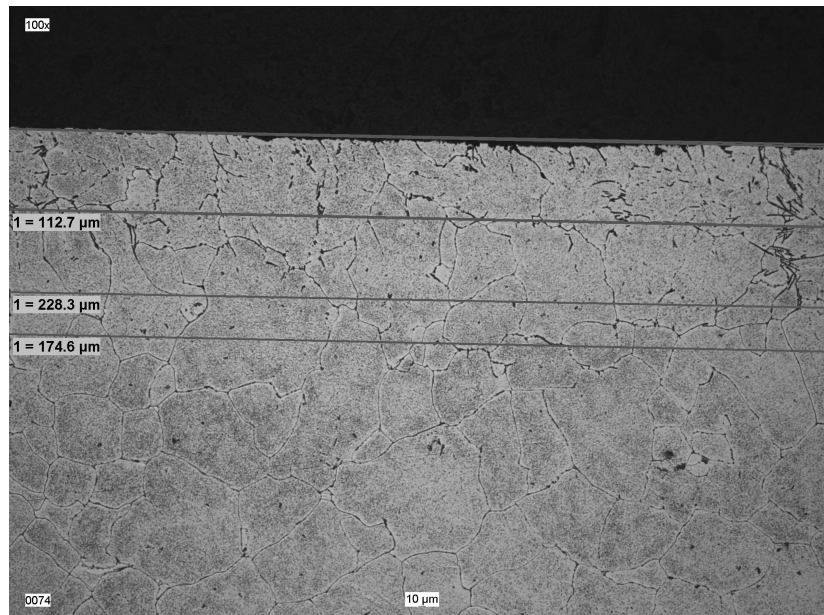
Segregación inversa máxima

Del molde de referencia, cogemos la muestra en sentido longitudinal a la colada y medimos la segregación inversa:

SEGREGACIÓN INVERSA (μm)										REGULAR		X	VALOR MEDIO	101.7	
										IRREGULAR					
MEDIDAS				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VALOR MÁXIMO	112.7
50x		100x	X											75.7	



Segregación inversa mínima



Segregación inversa máxima

Conclusiones

Hemos observado que continúan saliendo las barras con las partes diferenciadas (lisa y rugosa) aunque se ha mejorado en los valores de la segregación inversa, reduciéndose considerablemente en las dos barras estudiadas.

Siguen apareciendo presolidificaciones en la barra del molde nuevo.

6.3 PRUEBA 3

Objetivo

Observar los cambios que se producen en la microestructura al variar la velocidad de colada, reduciéndola respecto a la prueba anterior. Ya que las velocidades altas son peligrosas para la puesta en marcha de la colada.

Metodología

Se realiza una colada (19879) poniendo el molde de diseño nuevo en la huella número 11 en la mesa de 9”. Temperatura de colada 722°C, Velocidad de colada 111 mm/min, Velocidad de adición de Titanio 55cm/min. Resto de parámetros normales.

Resultados

Al principio de la colada se ha caído la barra de la huella 11 (molde nuevo) por lo que no tenemos barra que analizar. Esto ha podido suceder por la posición de la pipa respecto a la canaleta.

Análisis de los datos obtenidos

Al obtener solamente la barra de referencia, no la analizamos porque no podemos compararla con la barra del molde nuevo.

Conclusiones

Para la próxima prueba variaremos la altura a la que entra el aluminio al molde, por si ha sido ésta la causa de la pérdida de la barra.

En la próxima prueba se reducirá la altura de la pipa 0.5 cm.

6.4 PRUEBA 4

Objetivo

En esta nueva prueba, se mantiene una velocidad similar a la de la prueba 3, y se varía la altura a la que entra el aluminio en el molde.

Metodología

Se realiza una colada (19880) poniendo el molde de diseño nuevo en la huella número 11 en la mesa de 9”. Temperatura de colada 723°C, Velocidad de colada 111 mm/min, Velocidad de adición de Titanio 55cm/min. Resto de parámetros normales.

Una vez realizada la colada, separamos dos barras:

- La barra numero 11: Barra realizada con el molde de diseño nuevo.
- La barra numero 12: Barra de referencia con molde habitual.

De ambas barras se toman muestras (rodajas) del inicio de colada.

Se realizan análisis macroscópico y microscópico.

Resultados

Una vez finalizada la colada se observan visualmente las barras obtenidas y nos encontramos con lo siguiente:

- Barra 12 de referencia: Tiene un aspecto homogéneo en toda la barra. Es rugosa con una especie de granos pequeños repartidos por toda la superficie.
- Barra 11 del molde de diseño nuevo: Los primeros 400mm de la barra tiene un aspecto muy bueno, liso y sin ningún tipo de rugosidad como la encontrada en el molde 12. A partir de los 400mm, hay un cambio en el aspecto superficial, volviéndose rugosa como la barra de referencia excepto una porción de arco la cual se mantiene lisa durante toda la barra.

Viendo esto, se decide coger las siguientes muestras:

Muestra Barra 12 (Referencia): Se cortará una rodaja del inicio de colada de la barra 12, se hará el examen macroscópico y una vez realizado éste, cogeremos una muestra de la corteza para prepararla para examen microscópico en sentido longitudinal de la colada.

Muestras Barra11: Cogemos una rodaja del inicio de colada en la parte lisa. A la rodaja se le hace examen macroscópico.

Análisis de los datos obtenidos

- Examen macroscópico:

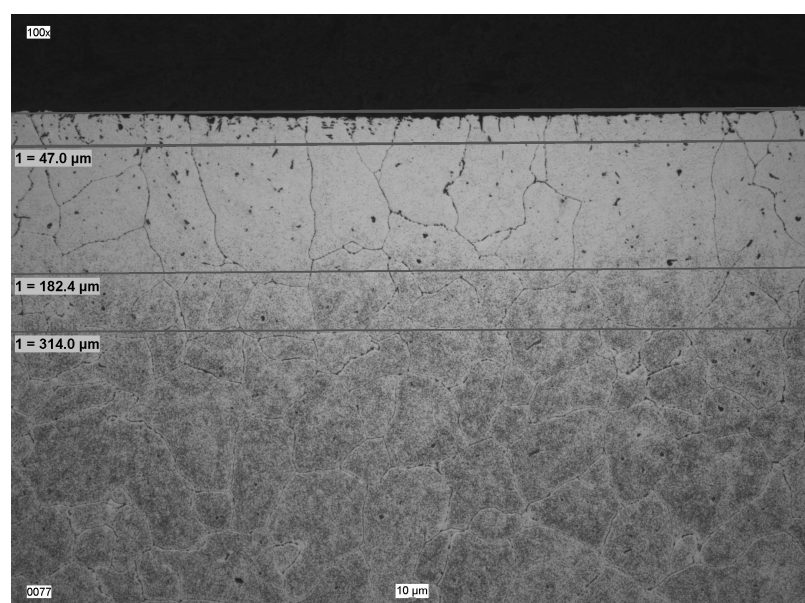
- En la barra de referencia no se aprecian ninguna presolidificación.
- En la barra realizada con el molde de diseño nuevo se aprecian presolidificaciones en la rodaja (antes y después de los 400mm).

- Examen microscópico:

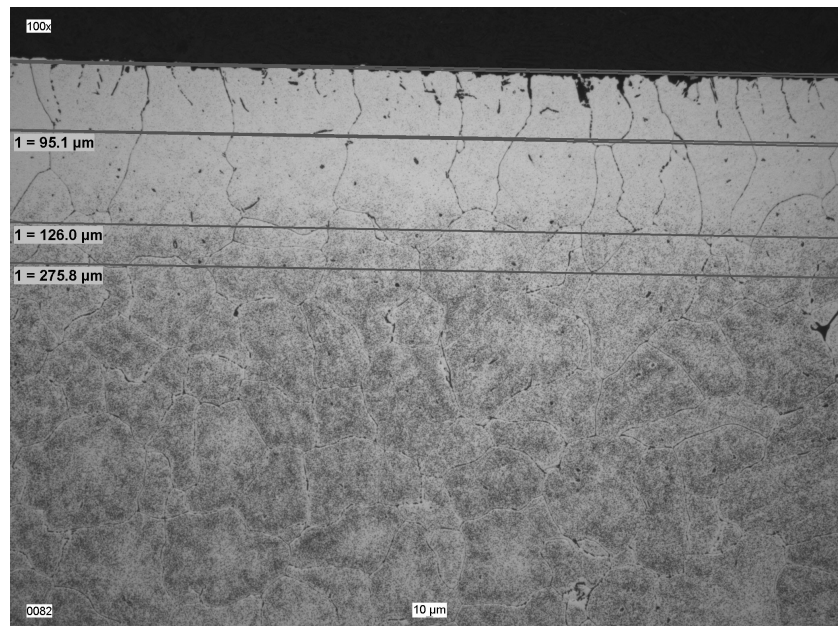
Cogemos las cuatro muestras y realizamos 10 fotografías de cada una de ellas con el microscopio. De esta manera, podemos medir la segregación inversa de cada muestra:

Del molde de nuevo diseño:

SEGREGACIÓN INVERSA (μm) Molde Nuevo - Aspecto Bueno										REGULAR		X	VALOR MEDIO	77.7	
										IRREGULAR					
MEDIDAS				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VALOR MÁXIMO	95.1
50x		100x	X	47.0	76.3	94.5	64.1	91.7	95.1	82.4	75.2	87.3	63.0	VALOR MÍNIMO	47.0



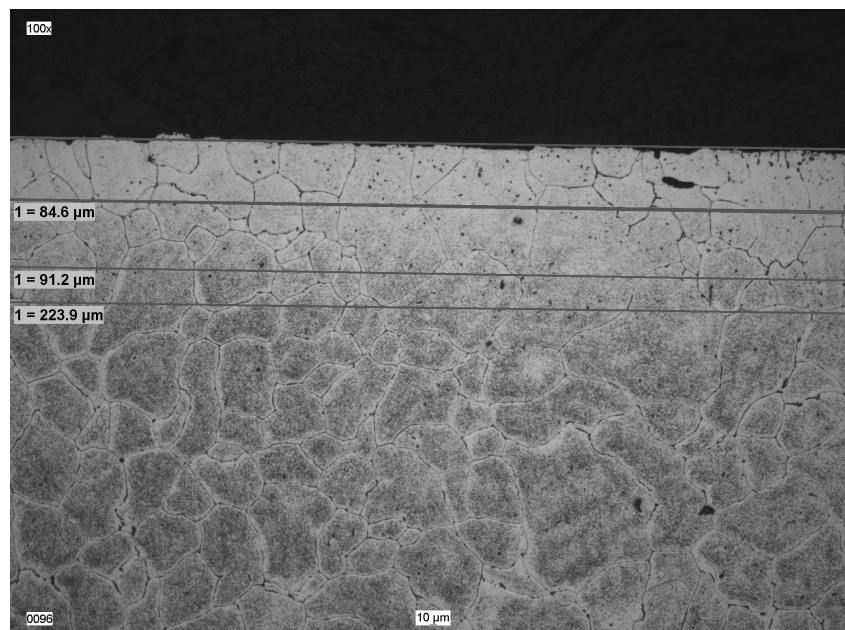
Segregación inversa mínima



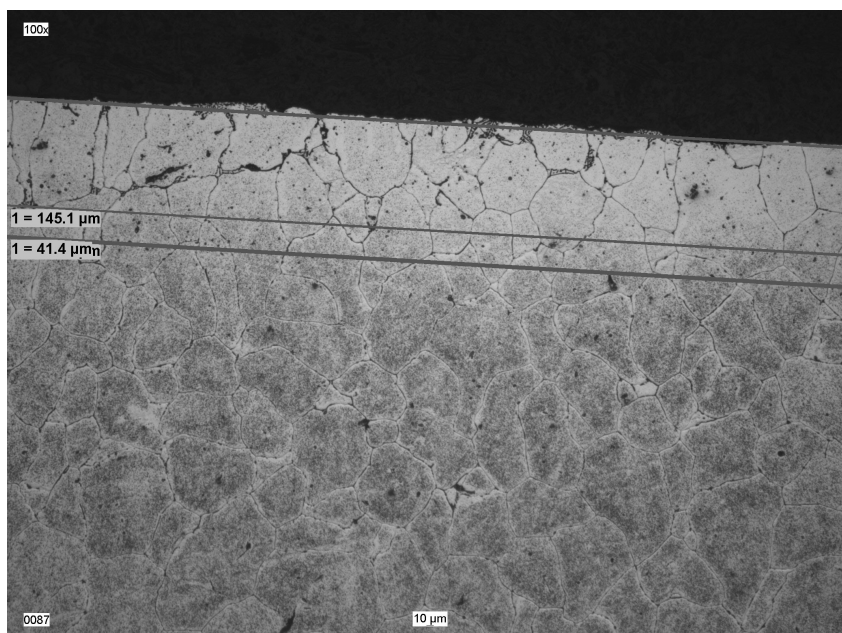
Segregación inversa máxima

Del molde de referencia, cogemos la muestra en sentido longitudinal a la colada y medimos la segregación inversa:

SEGREGACIÓN INVERSA (µm)											REGULAR			VALOR MEDIO	109.0
											IRREGULAR		X		
MEDIDAS				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	VALOR MÁXIMO	145.1
50x		100x	X	145.1	99.4	110.5	119.9	130.9	122.7	92.8	92.3	91.8	84.6	VALOR MÍNIMO	84.6



Segregación inversa mínima



Segregación inversa máxima

Conclusiones

Se ha conseguido obtener unas segregaciones inversas bastante bajas con el molde nuevo, más bajas que las de la prueba 2, pero continuamos teniendo una parte de la superficie de la barra rugosa.

6.5 PRUEBA 5

Objetivo

Tenemos el molde nuevo y la caja nueva, con una calidad aproximadamente buena pero es peligrosa su puesta en marcha.

Con esta prueba queremos comprobar si con la modificación realizada en el plano F2240 se elimina la peligrosidad, manteniendo la calidad que teníamos.

Metodología

Al nuevo molde de colada que hemos estado utilizando en las pruebas anteriores, se le realiza la siguiente modificación:

Se intenta que la lubricación sea mayor, queremos que se introduzca más aceite a través de los agujeros del molde.

Se realiza una colada (19915) poniendo el molde de diseño nuevo en la huella número 11 en la mesa de 9". Temperatura de colada 723°C, Velocidad de colada 111 mm/min, Velocidad de adición de Titanio 55cm/min. Resto de parámetros normales.

Resultados

Al realizarse la colada, ha aparecido un nuevo problema: el aluminio estaba a tanta temperatura que se ha deslizado muy rápido, y ha atrapado agua en el final de la colada, provocando unos agujeros en la superficie, y con el consecuente riesgo de explosión.

Se han obtenido unas barras con unos grandes agujeros en el final de barra, y agujeros a lo largo de toda la barra. Se pueden observar en las siguientes fotografías:



Análisis de los datos obtenidos

De esta colada no hacemos análisis macroscópico ni microscópico, ya que los resultados no pueden ser nada buenos si visualmente se aprecian estos agujeros (poros).

Conclusiones

La peligrosidad en la colada no ha desaparecido, que era el principal objetivo de esta prueba.

Han aparecido grietas y agujeros en la superficie, esto ha sucedido por exceso de lubricación. Además, el flotador de 2 agujeros permite pasar el aluminio a través de éstos con muy fuerza, refundiendo la corteza que se estaba formando en contacto con el molde, formándose grietas.

En la próxima prueba, vamos a probar con algún flotador de diferente diseño.

6.6 PRUEBA 6

Objetivo

La puesta en marcha sigue siendo peligrosa, hay que evitar esto.

Vamos a hacer esta prueba poniendo dos tipos de flotadores con distinto diseño: unos flotadores de 2 agujeros (que son los que se han estado utilizando hasta ahora), y unos nuevos de 4 agujeros. Hay que comprobar que con los nuevos flotadores la colada se realiza sin ninguna complicación y que no se forman las grietas en la superficie.



Flotador de 2 agujeros y de 4 agujeros

Metodología

Se realiza una colada (21785) poniendo el molde de diseño nuevo en la huella número 11 en la mesa de 9". Temperatura de colada 720°C, Velocidad de colada 111 mm/min, Velocidad de adición de Titanio 55cm/min. Resto de parámetros normales.

Se van a analizar 4 huellas de esta colada que tienen diferentes condiciones:

Huella 11: con molde nuevo y flotador nuevo (4 agujeros).

Huella 12: con molde viejo y flotador viejo (2 agujeros).

Huella 13: con molde nuevo y flotador viejo (2 agujeros). Se nos ha caído la barra.

Huella 14: con molde viejo y flotador nuevo (4 agujeros).



Molde, flotador y casquillo antes de la colada



Aluminio dentro del molde; flotador tapando coquilla



Operarios durante la colada



*Operario con soplete para evitar que
se pegue el aluminio al flotador*



Proceso de colada

Resultados

Durante la colada, se ha perdido una barra (huella 13), esto ha podido ser porque el aluminio lleva una velocidad alta. Las demás han salidos con una calidad superficial mala, ya que han aparecido agujeros en la superficie, como sucedió en la prueba 5.

Creemos que ha podido suceder debido a la temperatura del aluminio sigue siendo alta, por lo que se ha deslizado muy rápido. Las grietas no han aparecido.



Poros en la superficie de la barra

Análisis de los datos obtenidos

Ha ocurrido algo similar a la quinta prueba, han desaparecido las grietas, pero siguen apareciendo los agujeros (poros) con el resultado de unas barras con una calidad superficial mala, por lo que no hacemos análisis en el laboratorio.

Conclusiones

Vamos a tener que seguir bajando la temperatura de colada hasta que deje de suceder la aparición de estos poros en la superficie de las barras.

6.7 PRUEBA 7

Objetivo

El objetivo principal es que la colada conlleve ningún riesgo para los operarios. Hay que evitar la peligrosidad en la puesta en marcha. Además, de seguir manteniendo la calidad conseguida en las primeras pruebas.

Metodología

Se realiza una colada (21955) poniendo el molde de diseño nuevo en la huella número 11 en la mesa de 9". Temperatura de colada 715°C, velocidad de colada 120 mm/min, velocidad de adición de Titanio 55cm/min. Resto de parámetros normales.

La colada se va a realizar con 12 moldes nuevos, algunos de ellos con la caja de agua nueva y flotadores de 4 agujeros, y otros con la caja de agua antigua y los flotadores viejos (2 agujeros).

Resultados

Inmediatamente después de arrancar, han tenido que parar la colada, porque el aluminio se estaba sobrando de los moldes. Se han empezado a crear burbujas, con el consecuente riesgo de explosión. No se había colado ni 15 cm de barra.

Esto ha podido ser debido a que el aluminio se ha enfriado antes de lo debido, y solidificando una capa que ha impedido el paso del aluminio que venía después.



Molde estropeado por el aluminio



Burbujas de aluminio solidificadas sobre molde

Análisis de los datos obtenidos

Se han recuperado 3 flotadores nuevos de los 7 que había, y habrá que ver si se pueden recuperar todos los moldes, aunque parece difícil.

No tenemos datos que analizar porque no tenemos barras.

Conclusiones

Hemos puesto una velocidad de colada muy alta para probar los flotadores nuevos a esa velocidad, pero sumado a la disminución de la temperatura del aluminio para evitar la formación de los poros en las barras, ha dado como resultado que el aluminio se ha sobrado de los moldes.

6.8 PRUEBA 8

Objetivo

Esta prueba se realiza con todos los moldes y flotadores nuevos (4 agujeros). Se pretende que la puesta en marcha no sea peligrosa.

Metodología

Se realiza una colada (22301) poniendo los moldes de diseño nuevo en las seis huellas de la mesa de 9”. Temperatura de colada - °C, velocidad de colada 105 mm/min, velocidad de adición de Titanio 55cm/min. Resto de parámetros normales.

Se pretende hacer dos coladas, una a más temperatura para calentar los flotadores, pipas, moldes, etc. para que no ocurra lo de la prueba anterior, y una segunda colada a menor temperatura para realizar la prueba 8.

Resultados

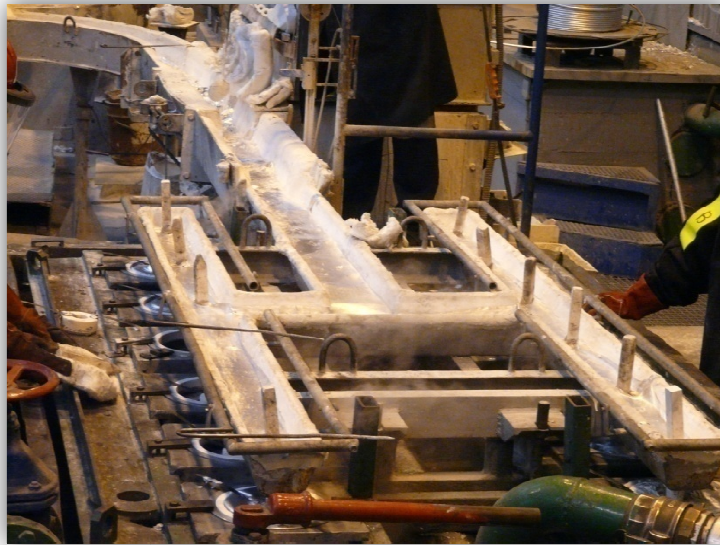
Cuando sólo hacía unos minutos del inicio de la colada, el aluminio se ha empezado a sobrar por encima de los moldes, como se puede observar paso a paso en estas fotografías:



Inicio de la colada



El aluminio empieza a sobrarse



Ya no queda casi ninguna huella libre



Aluminio cubriendo la mesa de moldes



Resultado de la prueba

Análisis de los datos obtenidos

En el arranque ha ido bien, porque al principio se cuela el aluminio del filtro cerámico (715°C de temperatura), pero luego al pasar el aluminio del sniff, no ha tenido la suficiente temperatura (algo menos de 690°C porque tenía una resistencia, de las tres que tiene, estropeada), por lo que el aluminio es menos fluido.

Entonces, no se ha colado bien, y ha empezado a sobrase el aluminio por arriba. Como en la prueba anterior. Se ha parado la prueba.

Se han perdido por lo menos 4 moldes, y casi todos los flotadores. No tenemos barras para analizar.

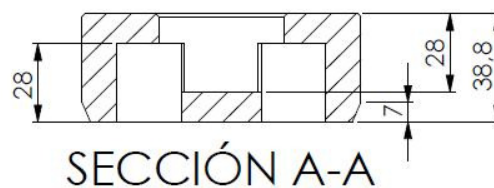
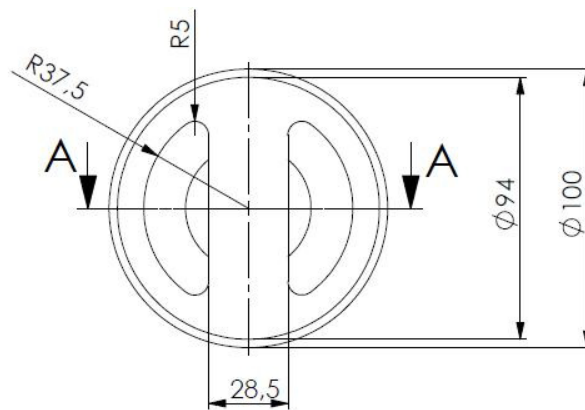
Conclusiones

Con una velocidad de colada menor ha ocurrido lo mismo que en la prueba anterior (7), eso quiere decir que el diseño de estos nuevos flotadores no funciona para velocidades altas (mayores de 100mm/min).

Hemos visto que poniendo los flotadores de 4 agujeros nos solucionaban el problema de las grietas en la superficie, ya que los flotadores de 2 agujeros dejaban pasar el aluminio golpeando con mucha presión contra la corteza recién formada de aluminio al tocar el molde, pero no es suficiente porque no deja pasar bien el aluminio a esas velocidades.

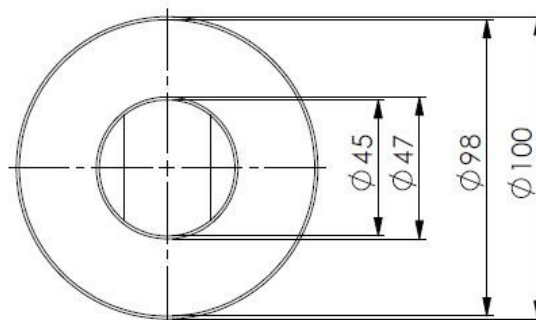
Vamos a comprobar qué diferencia de área tienen los flotadores de 4 agujeros y los de 2 agujeros:

Flotador de 2 agujeros:

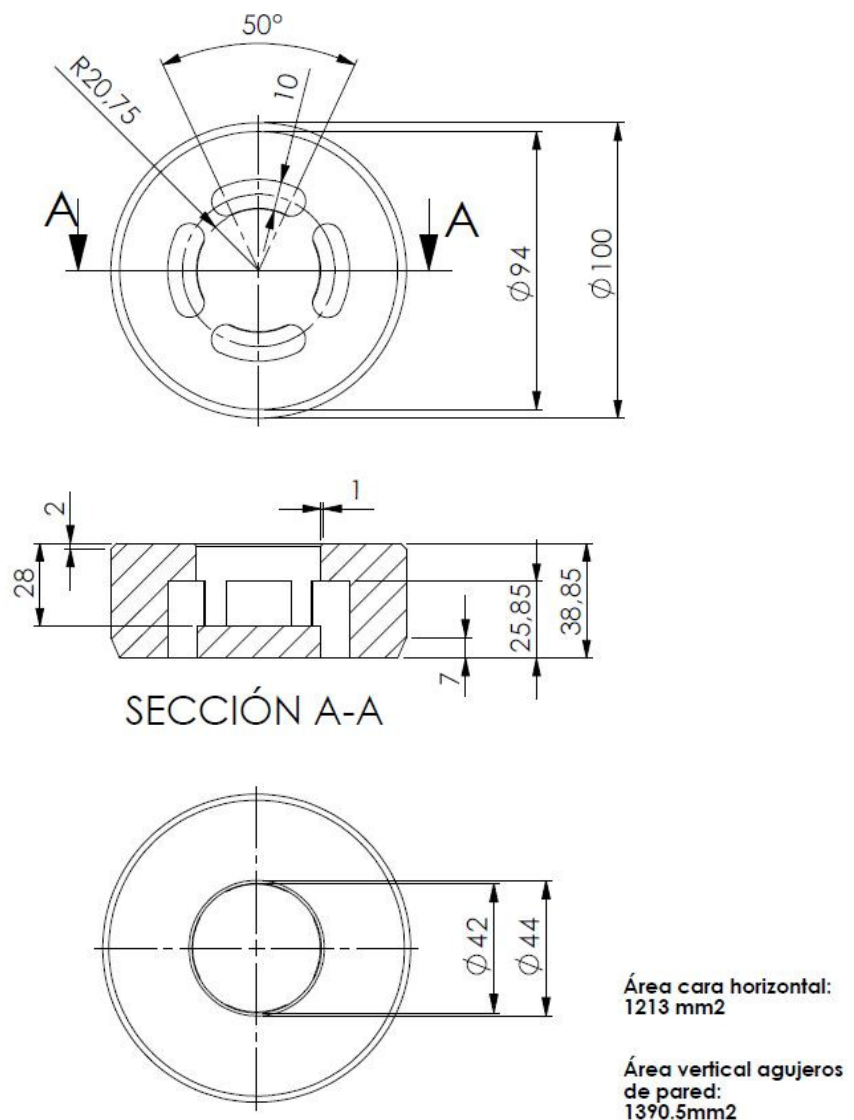


Área horizontal de
los agujeros:
2260.8 mm²

Área vertical de
los agujeros:
1859.3 mm²



Flotador de 4 agujeros:



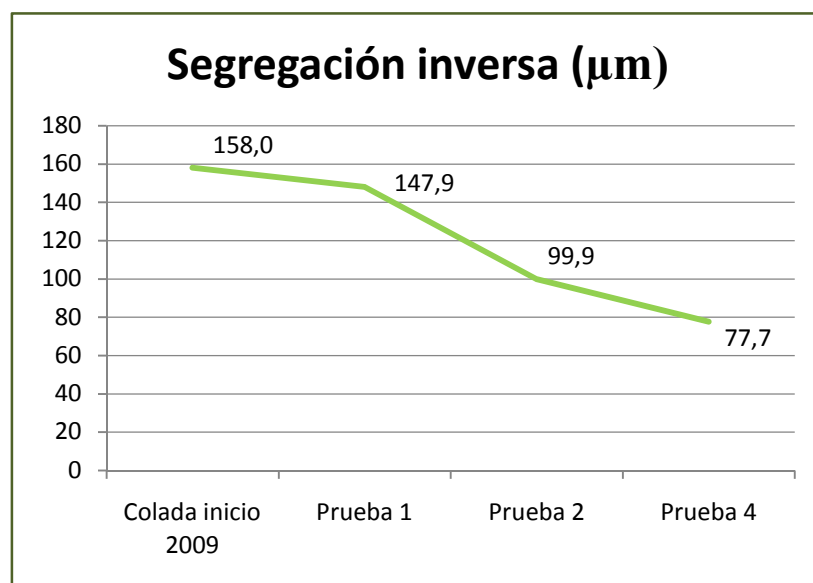
El área total de los flotadores de 2 agujeros es casi el doble que el de 4 agujeros. Por lo que es normal que a esas velocidades no deje pasar el aluminio para alimentar el molde y se salga por arriba.

7. CONCLUSIONES

Al inicio de este proyecto, el objetivo era mejorar la calidad de las barras en las aleaciones de extrusión, y mirando objetivos concretos a conseguir, pretendíamos disminuir el tamaño de la segregación inversa y mejorar el aspecto superficial de las barras que se mide con el orden de este.

De esta manera, en el transcurso de las pruebas realizadas han sucedido unas cuantas cosas a tener en cuenta:

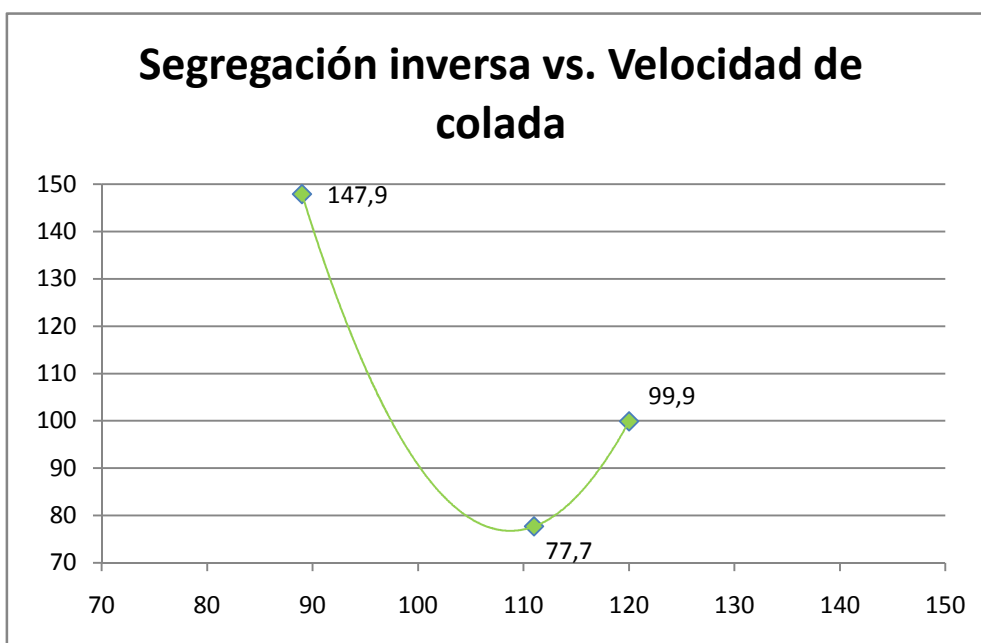
- 1- Con la modificación del molde, hemos observado, en las cuatro primeras pruebas, que ha disminuido mucho la segregación inversa. Tanto, que se ha conseguido mejorar los valores que tiene Alcoa La Coruña, e igualar a Hydro, para una velocidad de 111 mm/min.



Gráfica que muestra el descenso de la medida de segregación inversa con el molde nuevo

Hemos observado en las primeras pruebas que con una velocidad de colada baja (89 mm/min) da una segregación inversa alta (147,9 μm). Y si subimos mucho la velocidad de colada (120 mm/min), la segregación inversa tampoco es muy buena.

Así que con una velocidad media (111 mm/min), se ha conseguido la medida de la segregación inversa óptima. El rango de las velocidades a la que se debe realizar la colada se muestra en la siguiente gráfica: sería donde está el punto más bajo de la parábola (105- 113 mm/min).



Gráfica donde se muestra el rango de las velocidades donde debe colarse

- 2- En las cuatro primeras pruebas se ha conseguido mejorar el aspecto superficial de las barras, aunque esto solo ha sucedido en una pequeña parte de la longitud total de la barra. Obteniendo en esa parte un orden de 4-5.

Para industrializar las barras, se tiene que conseguir esa segregación inversa pequeña en la totalidad de la barra, además del aspecto superficial conseguido en esos primeros 400mm de la barra.

Para ello, a partir de la prueba 4 se han realizado variaciones en la lubricación, en la temperatura y en la velocidad.

Se ha intentado aumentar la lubricación (prueba 5) pero eso ha dado como consecuencia la aparición de poros en la superficie.

También se ha visto que aparecían unas grietas en la superficie de la barra que eran debidas a los flotadores de 2 agujeros, ya que el aluminio pasa por los agujeros golpeando con gran presión la corteza que se está formando de aluminio al contacto con el molde, lo que hace que se refunda provocando esas grietas.

Y al cambiar a flotadores de 4 agujeros, el aluminio se distribuye más y choca con menos fuerza contra la corteza que no la llega a fundir, lo que no provoca grietas.

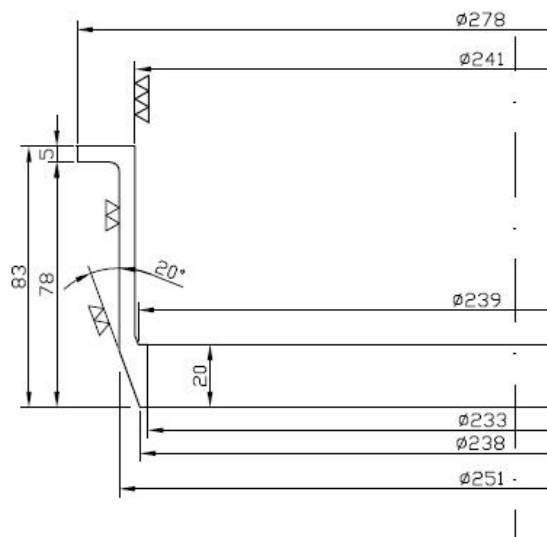
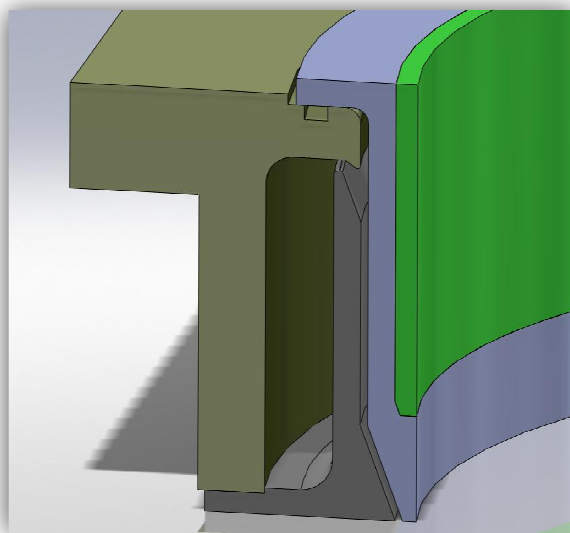
Ese cambio de flotadores nos ha solucionado el problema de las grietas pero ha surgido otro. El área de salida de estos flotadores no es lo suficientemente grande para colar tal cantidad de aluminio.

8. SUGERENCIAS PARA FUTURAS PRUEBAS

Tras una visita a la planta de Sapa Ghlin (Bélgica), Gilbert Deleu, uno de los expertos del grupo basado en dicha planta, nos explicó que los problemas que han aparecido en las pruebas han sido debidos a la refrigeración del molde. Con su apoyo, se han determinado los siguientes pasos a tratar:

- Rediseño del molde de fundición.

Se pretende incrementar la refrigeración secundaria, la que produce el molde. Por eso, se hará un molde más aluminio en la parte de abajo (por lo menos 20mm, actualmente tiene 2mm).



Forma que tendría el nuevo molde

- Rediseño de la distribución de agua de refrigeración alrededor del molde.
- Disminución de la cantidad de agua que alimenta a cada molde (disminución de la refrigeración primaria).

El caudal de agua que tenemos actualmente es de $135 \text{ m}^3/\text{h}$ a unos 22°C . Entonces, según la siguiente fórmula que se utiliza en otras fundiciones de Sapa, se tendrá que disminuir ese caudal hasta ser:

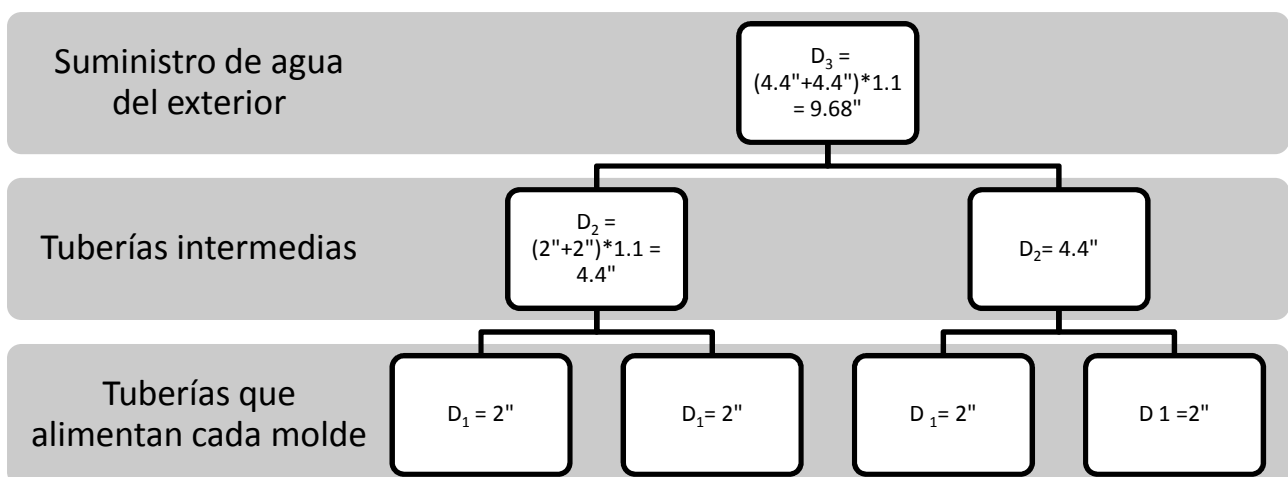
$$Q(v) = \frac{[147 \text{ kg} / \text{min}] * 8,75 \text{ l} / \text{kg} * 60}{1000} + 22 - 25 = 74 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Siendo:

- 147 kg/min → kg de Al que se producen por minuto.
- 8,75 l / kg → variable que representa los litros por cada kg de Al que entra.
- 60 → al convertir min en h.
- 1000 → al convertir litros en m³.
- 22 → temperatura a la que entra el agua (°C).
- 25 → constante. Ya que se considera que 25°C es la temperatura de estabilidad, así que se suma o resta 1 m³/h dependiendo si tiene un grado más o menos a lo que debería tener.

- Homogeneización de la cantidad de agua que llega a cada molde.

Si el diámetro de la tubería de entrada al molde es de 2” entonces habría que seguir un Diagrama de árbol para calcular los diámetros de las tuberías que alimentan a ésta, hasta llegar a la primera tubería de suministro de agua. Vamos a suponer que hay solamente 4 moldes que alimentar, entonces para hallar los diámetros de cada tubería se procedería de la siguiente manera:



- Control del nivel de metal durante la colada.

Actualmente, esto no se puede llevar a cabo, no tenemos medios para controlar ese parámetro.

9. BIBLIOGRAFÍA

- ALUMINUM: PROPERTIES AND PHYSICAL METALLURGY. John E. Hatch. American Society For Metal 1984
- ALUMINUM AND ALUMINUM ALLOYS. ASM International. Ed J.R. Davis, Davis & Associates.
- PROCESO DE CONFORMADO DEL ALUMINIO Y SUS ALEANTES, II. Ed Urmo.
- ALUMINUM CASTING TECHNOLOGY 2ND EDITION. AFS American Foundrymen's society, ING. Ed Dona L. Zalensas.
- ET 2000 PROCEEDINGS: SEVENTH INTERNATIONAL ALUMINIUM EXTRUSION TECHNOLOGY SEMINAR. AEC (Aluminum Extruders Council).
- ENCICLOPEDIA DEL ALUMINIO (por los ingenieros del grupo PECHINEY). Ed Urmo 1968.
- NORMAS UNE-EN 755-2 y UNE-EN 573-3.
- Documentación de Sapa Profiles Navarra.
- www.sapagroup.com

Anexo I

INFORMES DE LAS PRUEBAS

PRUEBA 1

1. SITUACIÓN ACTUAL

Tenemos el molde nuevo y la caja nueva, queremos ver la calidad a una velocidad de colada de 90mm/min.

2. OBJETIVO DE LA PRUEBA

Ver cómo funciona el molde nuevo.

3. METODOLOGÍA

Montar el plato de agua nuevo y el molde nuevo (posición 11), subir el bajo fondo medio centímetro. Tomar como referencia la barra 12.

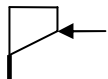
4. DATOS

DÍA	HORA	Nº COLADA	ALEACIÓN	DIÁMETRO
11/02/09	12:00	19829	6060	9 pulgadas

COMPOSICIÓN:

	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Ti	Cr	Zn	Na
V. medido	0,17	0,50	0,38	0,066	0,031	0,012	0,009	0,012	0,0000

PARÁMETROS DE COLADA:

Variable	V. objetivo	V. medido	Variable	V. objetivo	V. medido
Caudal CI (l)	70	70	Altura de la pipa		
Caudal Ar (m ³ /h)	2,2	2,2	Altura resto de pipas (mm)		
Rpm Sniff	330	330	Aporte Varilla Titanio (cm/mm)	55	55
T° Trasvase (°C)	740				
T ^a Colada (°C):			a 2000 mm	720	726
a 500 mm	720		a 3000 mm	720	
a 1000 mm	720		a 4000 mm	720	

DESGASIFICADO: Realizar un ensayo de desgasificado en la colada posterior a la prueba.

CUADRO DE VELOCIDADES:

Velocidad (mm/min)	Desplazamiento (mm)
50	1
55	5
62	110
90	180
120	250
Programa de colada	15

5. MUESTRAS A GUARDAR

Barras 11 y 12 homogeneizadas y marcadas.

PRUEBA 2

1. SITUACIÓN ACTUAL

Tenemos el molde nuevo y la caja nueva, queremos ver la calidad a $V=120$ mm/min.

2. OBJETIVO DE LA PRUEBA

Ver cómo funciona el molde nuevo a velocidades altas.

3. METODOLOGÍA

Montar el plato de agua nuevo y el molde nuevo (posición 11). Tomar como referencia la barra 12.

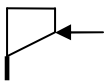
4. DATOS

DÍA	HORA	Nº COLADA	ALEACIÓN	DIÁMETRO
18/02/09	7:00	19865	6060	9 pulgadas

COMPOSICIÓN:

	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Ti	Cr	Zn	Na
V. medido	0,18	0,50	0,38	0,056	0,029	0,012	0,006	0,008	0,0000

PARÁMETROS DE COLADA:

Variable	V. objetivo	V. medido	Variable	V. objetivo	V. medido
Caudal Cl (l)	70	70	Altura de la pipa		7 cm de la canaleta
Caudal Ar (m ³ /h)	2,2	2,2	Altura resto de pipas (mm)		
Rpm Sniff	330	330	Aporte Varilla Titanio (cm/mm)	55	55
T° Trasvase (°C)	740				
T ^a Colada (°C):			a 2000 mm	720	718
a 500 mm	720		a 3000 mm	720	
a 1000 mm	720		a 4000 mm	720	

DESGASIFICADO: Realizar un ensayo de desgasificado en la colada posterior a la prueba.

CUADRO DE VELOCIDADES:

Velocidad (mm/min)	Desplazamiento (mm)
50	1
55	5
62	110
90	180
120	250
Programa de colada	15

5. MUESTRAS A GUARDAR

Barras 11 y 12 homogeneizadas y marcadas.

PRUEBA 3

1. SITUACIÓN ACTUAL

Tenemos el molde nuevo y la caja nueva, queremos ver la calidad a $V=111\text{mm/min}$ con la pipa 1cm más baja que la prueba 2.

2. OBJETIVO DE LA PRUEBA

Ver cómo funciona el molde nuevo a velocidades altas.

3. METODOLOGÍA

Montar el plato de agua nuevo y el molde nuevo (posición 11). Tomar como referencia la barra 12.

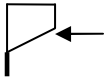
4. DATOS

DÍA	HORA	Nº COLADA	ALEACIÓN	DIÁMETRO
19/02/09	10:00	19879	6060	9 pulgadas

COMPOSICIÓN:

	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Ti	Cr	Zn	Na
V. medido	0,19	0,47	0,37	0,060	0,023	0,010	0,007	0,011	0,0000

PARÁMETROS DE COLADA:

Variable	V. objetivo	V. medido	Variable	V.objetivo	V.medido
Caudal Cl (l)	70	70	Altura de la pipa		8 cm de la canaleta
Caudal Ar (m ³ /h)	2,2	2,2	Altura resto de pipas (mm)		
Rpm Sniff	330	330	Aporte Varilla Titanio (cm/mm)	55	55
T° Trasvase (°C)	740				
T ^a Colada (°C):			a 2000 mm	720	722
a 500 mm	720		a 3000 mm	720	
a 1000 mm	720		a 4000 mm	720	

DESGASIFICADO: Realizar un ensayo de desgasificado en la colada posterior a la prueba.

CUADRO DE VELOCIDADES:

Velocidad (mm/min)	Desplazamiento (mm)
50	1
55	5
62	110
90	180
120	250
Programa de colada	15

5. MUESTRAS A GUARDAR

Barras 11 y 12 homogeneizadas y marcadas.

PRUEBA 4

1. SITUACIÓN ACTUAL

Tenemos el molde nuevo y la caja nueva, queremos ver la calidad a $V=110\text{mm/min}$ con la pipa 0,5 cm más alta que la prueba 3.

2. OBJETIVO DE LA PRUEBA

Ver cómo funciona el molde nuevo a velocidades altas.

3. METODOLOGÍA

Montar el plato de agua nuevo y el molde nuevo (posición 11). Tomar como referencia la barra 12.

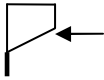
4. DATOS

DÍA	HORA	Nº COLADA	ALEACIÓN	DIÁMETRO
19/02/09	12:00	19880	6060	9 pulgadas

COMPOSICIÓN:

	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Ti	Cr	Zn	Na
V. medido	0,20	0,50	0,37	0,053	0,020	0,009	0,006	0,012	0,0000

PARÁMETROS DE COLADA:

Variable	V. objetivo	V. medido	Variable	V.objetivo	V.medido
Caudal Cl (l)	70	70	Altura de la pipa		8 cm de la canaleta
Caudal Ar (m ³ /h)	2,2	2,2	Altura resto de pipas (mm)		
Rpm Sniff	330	330	Aporte Varilla Titanio (cm/mm)	55	55
T° Trasvase (°C)	740				
T ^a Colada (°C):			a 2000 mm	720	723
a 500 mm	720		a 3000 mm	720	
a 1000 mm	720		a 4000 mm	720	

DESGASIFICADO: Realizar un ensayo de desgasificado en la colada posterior a la prueba.

CUADRO DE VELOCIDADES:

Velocidad (mm/min)	Desplazamiento (mm)
50	1
55	5
62	110
90	180
120	250
Programa de colada	15

5. MUESTRAS A GUARDAR

Barras 11 y 12 homogeneizadas y marcadas.

PRUEBA 5

1. SITUACIÓN ACTUAL

Tenemos el molde nuevo y la caja nueva, con una calidad aproximadamente buena pero es peligrosa su puesta en marcha.

2. OBJETIVO DE LA PRUEBA

Comprobar si con la modificación realizada en el plano F2240 se elimina la peligrosidad, manteniendo la calidad que teníamos.

3. METODOLOGÍA

Montar el plato de agua nuevo y el molde nuevo (posición 11), subir el bajo fondo medio centímetro. Tomar como referencia la barra 12.

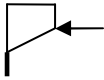
4. DATOS

DÍA	HORA	Nº COLADA	ALEACIÓN	DIÁMETRO
24/02/09	10:30	19915	6060	9 pulgadas

COMPOSICIÓN:

	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Ti	Cr	Zn	Na
V. medido	0,19	0,48	0,37	0,055	0,021	0,010	0,007	0,011	0,0000

PARÁMETROS DE COLADA:

Variable	V. objetivo	V. medido	Variable	V.objetivo	V.medido
Caudal Cl (l)	70	70	Altura de la pipa		
Caudal Ar (m ³ /h)	2,2	2,2	Altura resto de pipas (mm)		
Rpm Sniff	330	330	Aporte Varilla Titanio (cm/mm)	55	55
T° Trasvase (°C)	740				
Tª Colada (°C):			a 2000 mm	720	723
a 500 mm	720		a 3000 mm	720	
a 1000 mm	720		a 4000 mm	720	

DESGASIFICADO: Realizar un ensayo de desgasificado en la colada posterior a la prueba.

CUADRO DE VELOCIDADES:

Velocidad (mm/min)	Desplazamiento (mm)
50	1
55	5
62	110
90	180
120	250
Programa de colada	15

5. MUESTRAS A GUARDAR

Barras 11 y 12 homogeneizadas y marcadas.

PRUEBA 6

1. SITUACIÓN ACTUAL

Las barras están apareciendo con agujeros en la superficie. Y la puesta en marcha de la colada sigue siendo peligrosa para los operarios.

2. OBJETIVO DE LA PRUEBA

Eliminación de la peligrosidad de la puesta en marcha.

Utilización combinada de dos tipos de flotadores, para ver si se puede mantener la calidad que habíamos conseguido en las primeras pruebas pero en toda la barra.

3. METODOLOGÍA

Montar el plato de agua nuevo y el molde nuevo (posición 11). Tomar como referencia la barra 12 que tiene molde viejo y flotador viejo, también tomaremos la barra de la huella 13 que tiene un molde nuevo y flotador viejo, y por último, la barra de la huella 14, que tiene un molde viejo y un flotador nuevo.

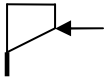
4. DATOS

DÍA	HORA	Nº COLADA	ALEACIÓN	DIÁMETRO
30/10/09	11:30	21785	6060	9 pulgadas

COMPOSICIÓN:

	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Ti	Cr	Zn	Na
V. medido	0,20	0,49	0,39	0,054	0,022	0,011	0,006	0,011	0,0000

PARÁMETROS DE COLADA:

Variable	V. objetivo	V. medido	Variable	V.objetivo	V.medido
Caudal Cl (l)	70	70	Altura de la pipa		
Caudal Ar (m ³ /h)	2,2	2,2	Altura resto de pipas (mm)		
Rpm Sniff	330	330	Aporte Varilla Titanio (cm/mm)	55	55
T° Trasvase (°C)	740				
Tª Colada (°C):			a 2000 mm	720	720
a 500 mm	720		a 3000 mm	720	
a 1000 mm	720		a 4000 mm	720	

DESGASIFICADO: Realizar un ensayo de desgasificado en la colada posterior a la prueba.

CUADRO DE VELOCIDADES:

Velocidad (mm/min)	Desplazamiento (mm)
50	1
55	5
62	110
90	180
120	250
Programa de colada	15

5. MUESTRAS A GUARDAR

Barras 11, 12, 13 y 14 homogeneizadas y marcadas.

PRUEBA 7

1. SITUACIÓN ACTUAL

Tenemos un problema en las barras que es que aparecen agujeros en la superficie, por ello vamos a reducir la temperatura del aluminio de 720°C a 715°C, para ver si desaparecen.

2. OBJETIVO DE LA PRUEBA

El objetivo principal es que la colada conlleve ningún riesgo para los operarios. Hay que evitar la peligrosidad en la puesta en marcha. Además, de seguir manteniendo la calidad conseguida en las primeras pruebas.

3. METODOLOGÍA

La colada se va a realizar con 12 moldes nuevos, algunos de ellos con la caja de agua nueva y flotadores de 4 agujeros, y otros con la caja de agua antigua y los flotadores viejos (2 agujeros). Velocidad de colada: 120 mm/min.

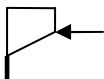
4. DATOS

DÍA	HORA	Nº COLADA	ALEACIÓN	DIÁMETRO
17/12/09	11:30 h	21955	6060	9"

COMPOSICIÓN:

	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Ti	Cr	Zn	V	Na
V. medido	0.19	0.46	0.40	0.053	0.029	0.011	0.008	0.014	0.005	0.0000

PARÁMETROS DE COLADA:

Variable	V. objetivo	V. medido	Variable	V.objetivo	V.medido
Caudal CI (l)	70	70	Altura de la pipa		
Caudal Ar (m ³ /h)	2,2	2,2	Altura resto de pipas (mm)		
Rpm Sniff	330	330	Aporte Varilla Titanio (cm/mm)	55	55
T° Traspase (°C)	740				
Tª Colada (°C):			a 2000 mm	720	715
a 500 mm	720		a 3000 mm	720	
a 1000 mm	720		a 4000 mm	720	

DESGASIFICADO: Realizar un ensayo de desgasificado en la colada posterior a la prueba.

CUADRO DE VELOCIDADES:

Velocidad (mm/min)	Desplazamiento (mm)
50	1
55	5
70	220
90	350
105	500
Programa de colada	1

5. MUESTRAS A GUARDAR

Barras de las huellas 11 y 12 homogeneizadas y marcadas.

PRUEBA 8

1. SITUACIÓN ACTUAL

Vamos a realizar la prueba con todos los moldes y flotadores nuevos. Se aumentará la temperatura de colada unos grados.

2. OBJETIVO DE LA PRUEBA

Eliminar la peligrosidad en la puesta en marcha. Además de que no nos ocurra como en la prueba anterior que no se ha colado bien por tener baja la temperatura de colada.

3. METODOLOGÍA

Se pretende hacer dos coladas, una a más temperatura para calentar los flotadores, pipas, moldes, etc. para que no ocurra lo de la prueba anterior, y una segunda colada a menor temperatura para realizar la prueba 8.

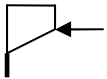
4. DATOS

DÍA	HORA	Nº COLADA	ALEACIÓN	DIÁMETRO
10/02/10	11:00 h	22301	6060	9"

COMPOSICIÓN:

	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Ti	Cr	Zn	V	Na
V. medido	0.20	0.48	0.38	0.046	0.029	0.011	0.007	0.018	0.006	0.0002

PARÁMETROS DE COLADA:

Variable	V. objetivo	V. medido	Variable	V.objetivo	V.medido
Caudal Cl (l)	70	70	Altura de la pipa		
Caudal Ar (m³/h)	2,2	2,2	Altura resto de pipas (mm)		
Rpm Sniff	330	330	Aporte Varilla Titanio (cm/mm)	55	55
Tº Traspase (ºC)	740	778			
Tª Colada (ºC):			a 2000 mm	720	
a 500 mm	720		a 3000 mm	720	
a 1000 mm	720		a 4000 mm	720	

DESGASIFICADO: Realizar un ensayo de desgasificado en la colada posterior a la prueba.

CUADRO DE VELOCIDADES:

Velocidad (mm/min)	Desplazamiento (mm)
50	1
55	5
70	220
90	350
105	500
Programa de colada	1

5. MUESTRAS A GUARDAR

Barra de la huella 11 homogeneizada y marcada.

Anexo II

Datos de composición de las aleaciones de aluminio de la serie 6XXX según la norma UNE-EN 573-3:

Aleaciones de aluminio – Serie 6000 – Al MgSi

Designación de la aleación		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Notas	Otras ¹⁴		Aluminio
Númerica	Simbólica													Cada	Total	mín.
EN AW-6101	EN AW-EAl MgSi	0,30-0,7	0,50	0,10	0,03	0,35-0,8	0,03	-	0,10	-	-	-	0,06 B	0,03	0,10	Reso
EN AW-6101A	EN AW-EAl MgSi(A)	0,30-0,7	0,40	0,05	-	0,40-0,9	-	-	-	-	-	-	-	0,03	0,10	Reso
EN AW-6101B	EN AW-EAl MgSi(B)	0,30-0,6	0,10-0,30	0,05	0,05	0,35-0,6	-	-	0,10	-	-	-	-	0,03	0,10	Reso
EN AW-6201	EN AW-EAl Mg0,7Si	0,50-0,9	0,50	0,10	0,03	0,6-0,9	0,03	-	0,10	-	-	-	0,06 B	0,03	0,10	Reso
EN AW-6401	EN AW-Al 99,9MgSi	0,35-0,7	0,04	0,05-0,20	0,03	0,35-0,7	-	-	0,04	0,01	-	-	-	0,01	-	Reso
EN AW-6003	EN AW-Al Mg1Si0,8	0,35-1,0	0,6	0,10	0,8	0,8-1,5	0,35	-	0,20	0,10	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6005	EN AW-Al SiMg	0,6-0,9	0,35	0,10	0,10	0,40-0,6	0,10	-	0,10	0,10	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6005A	EN AW-Al SiMg(A)	0,50-0,9	0,35	0,30	0,50	0,40-0,7	0,30	-	0,20	0,10	-	-	0,12-0,50 Mn+Cr	0,05	0,15	Reso
EN AW-6005B	EN AW-Al SiMg(B)	0,45-0,8	0,30	0,10	0,10	0,40-0,8	0,10	-	0,10	0,10	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6106	EN AW-Al MgSiMn	0,30-0,6	0,35	0,25	0,05-0,20	0,40-0,8	0,20	-	0,10	-	-	-	-	0,05	0,10	Reso
EN AW-6008	EN AW-Al SiMgV	0,50-0,9	0,35	0,30	0,30	0,40-0,7	0,30	-	0,20	0,10	-	0,05-0,20	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6011	EN AW-Al Mg0,9Si0,9Cu	0,6-1,2	1,0	0,40-0,9	0,8	0,6-1,2	0,30	0,20	1,5	0,20	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6012	EN AW-Al MgSiPb	0,6-1,4	0,50	0,10	0,40-1,0	0,6-1,2	0,30	-	0,30	0,20	-	-	0,7 Bi, 0,40-2,0 Pb	0,05	0,15	Reso
EN AW-6013	EN AW-Al Mg1Si0,8CuMn	0,6-1,0	0,50	0,6-1,1	0,20-0,8	0,8-1,2	0,10	-	0,25	0,10	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6015	EN AW-Al Mg1Si0,3Cu	0,20-0,40	0,10-0,30	0,10-0,25	0,10	0,8-1,1	0,10	-	0,10	0,10	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6016	EN AW-Al Si1,2Mg0,4	1,0-1,5	0,50	0,20	0,20	0,25-0,6	0,10	-	0,20	0,15	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6018	EN AW-Al Mg1SiPbMn	0,50-1,2	0,7	0,15-0,40	0,30-0,8	0,6-1,2	0,10	-	0,30	0,20	-	-	16	0,05	0,15	Reso
EN AW-6351	EN AW-Al SiMg0,5Mn	0,7-1,3	0,50	0,10	0,40-0,8	0,40-0,8	-	-	0,20	0,20	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6351A	EN AW-Al SiMg0,5Mn(A)	0,7-1,3	0,50	0,10	0,40-0,8	0,40-0,8	-	-	0,20	0,20	-	-	15	0,05	0,15	Reso
EN AW-6951	EN AW-Al MgSi0,3Cu	0,20-0,50	0,8	0,15-0,40	0,10	0,40-0,8	-	-	0,20	-	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6056	EN AW-Al SiMgCuMn	0,7-1,3	0,50	0,50-1,1	0,40-1,0	0,6-1,2	0,25	-	0,10-0,7	17)	-	-	17	0,05	0,15	Reso
EN AW-6060	EN AW-Al MgSi	0,30-0,6	0,10-0,30	0,10	0,10	0,35-0,6	0,05	-	0,15	0,10	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6061	EN AW-Al Mg1SiCu	0,40-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	-	0,25	0,15	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6061A	EN AW-Al Mg1SiCu(A)	0,40-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	-	0,25	0,15	-	-	15	0,05	0,15	Reso
EN AW-6261	EN AW-Al Mg1SiCuMn	0,40-0,7	0,40	0,15-0,40	0,20-0,35	0,7-1,0	0,10	-	0,20	0,10	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6262	EN AW-Al Mg1SiPb	0,40-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,14	-	0,25	0,15	-	-	7	0,05	0,15	Reso
EN AW-6063	EN AW-Al Mg0,7Si	0,20-0,6	0,35	0,10	0,10	0,45-0,9	0,10	-	0,10	0,10	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6063A	EN AW-Al Mg0,7Si(A)	0,30-0,6	0,15-0,35	0,10	0,15	0,6-0,9	0,05	-	0,15	0,10	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6463	EN AW-Al Mg0,7Si(B)	0,20-0,6	0,15	0,30	0,05	0,45-0,9	-	-	0,05	-	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6081	EN AW-Al Si0,9MgMn	0,7-1,1	0,50	0,10	0,10-0,45	0,6-1,0	0,10	-	0,20	0,15	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6181	EN AW-Al SiMg0,8	0,8-1,2	0,45	0,30	0,15	0,6-1,0	0,10	-	0,20	0,10	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6082	EN AW-Al SiMgMn	0,7-1,3	0,50	0,30	0,40-1,0	0,6-1,2	0,25	-	0,20	0,10	-	-	-	0,05	0,15	Reso
EN AW-6082A	EN AW-Al SiMgMn(A)	0,7-1,3	0,50	0,10	0,40-1,0	0,6-1,2	0,25	-	0,20	0,10	-	-	15	0,05	0,15	Reso

Propiedades mecánicas de la aleación 6060 según la norma UNE-EN 755-2:

Aleación: EN AW-6060 [Al MgSi]

Barra extruida								
Estado de tratamiento	Medidas mm		R_m MPa		$R_{p0,2}$ MPa		A %	$A_{50\text{ mm}}$ %
	$D^{1)}$	$S^{2)}$	mín.	máx.	mín.	máx.	mín	mín.
T4 ³⁾	≤ 150	≤ 150	120	–	60	–	16	14
T5	≤ 150	≤ 150	160	–	120	–	8	6
T6 ⁵⁾	≤ 150	≤ 150	190	–	150	–	8	6
T64 ^{5) 8)}	≤ 50	≤ 50	180	–	120	–	12	10
T66 ⁵⁾	≤ 150	≤ 150	215	–	160	–	8	6
Tubo extruido								
Estado de tratamiento	Medidas mm		R_m MPa		$R_{p0,2}$ MPa		A %	$A_{50\text{ mm}}$ %
	$e^{3)}$		mín.	máx.	mín.	máx.	mín	mín.
T4 ³⁾	≤ 15		120	–	60	–	16	14
T5	≤ 15		160	–	120	–	8	6
T6 ⁵⁾	≤ 15		190	–	150	–	8	6
T64 ^{5) 8)}	≤ 15		180	–	120	–	12	10
T66 ⁵⁾	≤ 15		215	–	160	–	8	6
Perfil extruido ¹⁰⁾								
Estado de tratamiento	Medidas mm		R_m MPa		$R_{p0,2}$ MPa		A %	$A_{50\text{ mm}}$ %
	$e^{3)}$		mín.	máx.	mín.	máx.	mín	mín.
T4 ³⁾	≤ 25		120	–	60	–	16	14
T5	≤ 5		160	–	120	–	8	6
	$5 < e \leq 25$		140	–	100	–	8	6
T6 ⁵⁾	≤ 3		190	–	150	–	8	6
	$3 < e \leq 25$		170	–	140	–	8	6
T64 ^{5) 8)}	≤ 15		180	–	120	–	12	10
T66 ⁵⁾	≤ 3		215	–	160	–	8	6
	$3 < e \leq 25$		195	–	150	–	8	6

1) D = Diámetro de barras de sección circular.

2) S = Distancia entre caras para barras de sección cuadrada y hexagonal, espesor para barras de sección rectangular.

3) e = Espesor de la pared.

5) Las características pueden obtenerse mediante enfriamiento en prensa.

8) Calidad de flexión.

10) En caso de que la sección transversal esté compuesta por elementos de diferentes espesores para los que se aplican diferentes valores de características mecánicas especificadas, se debe considerar como válido para la sección completa el menor de los valores especificados.

Especificación de las aleaciones de aluminio para extrusión:

Designación Internacional de acuerdo con EN 573		Características mecánicas garantizadas de acuerdo con EN 755-2						Características mecánicas habituales Sapa Profiles Navarra			Resistencia a la corrosión	Curvados y conformados	Ejemplos de Aplicación
Númerica	Simbólica	Tratamiento	Influencia de forma y espesor de pared	Carga de rotura Rm (MPa)	Límite elástico 0.2% Rp (MPa)	Alargamiento A 50m (%)		Rm (MPa)	Rp (MPa)	A (%)			
EN AW-1050	EN AW-Al 99.5	F	No	60	20	23		70	30	30	Muy buena	Muy bien	Conectores eléctricos
EN AW-1060	EN AW-Al 99.6	F	No	60	20	23		70	30	30	Muy buena	Muy bien	Tubos aleateados para refrigeración
EN AW-3003	EN AW-Al Mn1Cu	F	No	95	35	20	AlMnCu	110	50	25	Muy buena	Muy bien	Tubos abocardados o curvados
EN AW-3103	EN AW-Al Mn1	F	No	95	35	20	AlMn1	130	70	25	Muy buena	Muy bien	Tubos abocardados o curvados
EN AW-6106	EN AW-AlMgSiMn	T6	e ≤ 10	250	200	6	-	260	220	8	Normal		Transporte
EN AW-6060	EN AW-Al MgSi	T4 T6	- e ≤ 3 5 < e ≤ 25	120 190 170	60 150 140	14 6 6	AlMgSi0.5-F13 AlMgSi0.5-F22 -	120 190 170	60 150 140	16 8 8	Buena	Bien	Arquitectura
EN AW-6063	EN AW-AlMg0.7Si	T4 T6 T66	- e ≤ 10 10 < e ≤ 25 e ≤ 10 10 < e ≤ 25	130 215 195 245 225	65 170 160 200 180	12 6 5 6 6	AlMgSi0.5-F13 AlMgSi0.5-F22 - AlMgSi0.5-F25 -	130 215 - 245 -	65 170 - 200 -	14 8 - - -	Buena	Bien Regular	Bicicletas Arquitectura Industria general Automóvil
EN AW-6005A	EN AW-AlSiMg(A)	T4 T6	e ≤ 10 e ≤ 5 5 < e ≤ 15	180 255 250	90 215 200	13 6 6	AlMgSi0.7-F27 - -	180 265	90 225	15 8	Buena	Bien Regular	Transporte Estructuras
EN AW-6061	EN AW-Al Mg1SiCu	T4 T6	e ≤ 25 e ≤ 5 5 < e ≤ 25	180 260 260	110 240 240	13 7 8	AlMg1SiCu - -	180 270 -	110 240 -	15 8 -	Buena	Bien Regular	Automóvil Estructuras Mecanización
EN AW-6082	EN AW-Al Si1MgMn	T4 F28 T6	e ≤ 25 e < 10 e ≤ 5 5 < e ≤ 15	205 275 290 310	110 200 250 260	12 10 6 8	AlMgSi1 AlMgSi1 F-28 AlMgSi1 F31 -	205 285 - 310	110 240 - 260	14 10 - 8	Buena	Bien Mal	Automóvil Estructuras Mecanización